



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**HYDRODYNAMICKÝ MODEL SOUTOKOVÉ
OBLASTI SVITAVY A SVRATKY**

HYDRODYNAMIC MODEL IN THE AREA OF THE CONFLUENCE OF THE RIVERS
SVITAVA AND SVRATKA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Halaška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ALEŠ DRÁB, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ondřej Halaška
Název	Hydrodynamický model soutokové oblasti Svitavy a Svratky
Vedoucí práce	doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- Odborná literatura z oboru matematického modelování proudění vody, numerických metod a geografických informačních systémů.
- Geodetické zaměření zájmových úseků vodních toků.
- Hydrologická data.
- Mapové podklady.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je realizace hydraulických výpočtů proudění vody v tocích a záplavových územích v soutokové oblasti Svitavy a Svratky na území města Brna. K výpočtům bude použit spřažený 1D a 2D numerický model. Výstupy práce budou zahrnovat:

- průvodní a technickou zprávu,
- fotodokumentaci,
- výsledky hydraulických výpočtů proudění vody pro zájmové úseky toků a záplavová území ve formě map povodňového nebezpečí,
- podélné a příčné profily toků se zakreslením vypočtených úrovní hladin.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá posouzením současného stavu povodňového nebezpečí soutokové oblasti Svitavy (km 2,050-6,812) a Svratky (km 33,948-38,030) v jižní části Brna. Byly provedeny hydraulické výpočty průchodu kulminačních průtoků Q_5 , Q_{20} , Q_{100} a Q_{100N} s použitím spřaženého 1D/2D numerického modelu. Výstupy byly zpracovány v podobě map povodňového nebezpečí, příčných a podélných profilů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Povodeň, protipovodňová ochrana, spřažený 1D/2D numerický model, Svitava, Svratka, Brno.

ABSTRACT

Master's thesis deals with present state assessment of flood hazard on rivers Svitava and Svratka in the southern part of Brno. Flood discharges Q_5 , Q_{20} , Q_{100} and Q_{100N} were solved using coupled 1D/2D numerical model. All results were evaluated as maps of hazard.

KEYWORDS

Flood, flood hazard, coupled 1D/2D numerical model, Svitava, Svratka, Brno.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ondřej Halaška *Hydrodynamický model soutokové oblasti Svitavy a Svratky*. Brno, 2018. 57 s., 15 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2018

Bc. Ondřej Halaška
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2018

Bc. Ondřej Halaška
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Aleši Drábovi, Ph.D. za jeho přístup, trpělivost a také poskytnutí výpočetního výkonu. Dále děkuji rodině a blízkým za podporu při studiu.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

A. PRŮVODNÍ A TECHNICKÁ ZPRÁVA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Halaška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ALEŠ DRÁB, Ph.D.

BRNO 2018

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍLE PRÁCE	2
3	POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	3
3.1	Vymezení zájmového území	3
3.2	Vodní tok Svratka	4
3.2.1	Geomorfologie	6
3.2.2	Tvar povodí a říční síť	7
3.2.3	Hydrologické údaje	7
3.2.4	Popis z hlediska stávající kapacity koryta	9
3.3	Vodní tok Svitava	11
3.3.1	Geomorfologie	14
3.3.2	Tvar povodí a říční síť	14
3.3.3	Hydrologické údaje	15
3.3.4	Popis z hlediska stávající kapacity koryta	16
3.4	Klimatické poměry v povodí Svratky a Svitavy	17
3.4.1	Teplota vzduchu	17
3.4.2	Srážky	17
3.4.3	Sněhové poměry	18
3.5	Vodní díla v povodí Svratky a Svitavy	18
3.6	Historické povodně	19
3.6.1	Červenec 1997	19
3.6.2	Přelom března a dubna 2006	20
4	HYDRAULICKÉ VÝPOČTY	22
4.1	Koncepční model	22
4.2	Matematický a numerický model	24
4.2.1	1D model	24
4.2.2	2D model	26
4.3	Vstupní data	27

4.3.1	Morfologie zájmového území.....	27
4.3.2	Drsnosti koryt a inundačního území	28
4.3.3	Okrajové podmínky	29
4.3.4	Počáteční podmínky	32
4.4	Nejistoty vstupních dat.....	32
4.4.1	Velikost elementu výpočetní sítě.....	32
4.4.2	Digitální model terénu	32
4.4.3	Součinitel drnosti.....	33
4.4.4	Hydrologická data	34
4.5	Kalibrace modelu.....	34
5	POSTUP ŘEŠENÍ V PROGRAMU BASEMENT	35
5.1	Uživatelské prostředí.....	35
5.2	Geometrie pro 1D model	39
5.3	Geometrie 2D modelu.....	41
5.4	Kontrola geometrie modelu	44
5.5	Spřažení 1D a 2D modelu.....	44
5.6	Zobrazení výstupů	45
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ	47
6.1	Kulminační průtok Q_5	47
6.2	Kulminační průtok Q_{20}.....	47
6.3	Kulminační průtok Q_{100}.....	48
6.4	Kulminační průtok Q_{100N}.....	48
7	ZÁVĚR.....	50
8	PODKLADY A LITERATURA	51
	SEZNAM TABULEK.....	54

SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM PŘÍLOH	57

1 ÚVOD

Povodní se rozumí přechodné zvýšení hladiny vodních toků, při kterém voda zaplavuje území mimo koryto vodního toku a může způsobit škody. Existují přirozené a zvláštní povodně, tato práce se zabývá pouze povodněmi přirozenými. Ty vznikají zejména v důsledku vydatných srážek, náhlého tání sněhové pokrývky nebo chodu ledů. Naposledy zasáhla Brno povodňová událost v roce 2006. Byla způsobena právě kombinací rychlého tání sněhu a vydatnými srážkami. Dojde-li k povodňové situaci, velmi často může dojít ke značným škodám na majetku a ohrožení zdraví obyvatelstva. Je proto potřeba zajistit patřičnou protipovodňovou ochranu, která bude minimalizovat negativní dopady povodní.

Tato práce se zabývá posouzením povodňového nebezpečí na území města Brna, v jeho jižní části. Konkrétně se jedná o úsek toku Svratky mezi silničním mostem ulice Vídeňská (km 38,030) a mostem dálnice D1 (km 33,948). Na řece Svitavě jde pak o úsek začínajícím silničním mostem na ulici Cejl (km 6,812) a končícím rovněž pod dálničním mostem D1 (km 2,050). Řešena jsou také přilehlá inundační území. Posouzení bylo provedeno na základě výsledků ze spřaženého 1D/2D modelu.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce bylo posouzení povodňového nebezpečí na území města Brna v soutokové oblasti řeky Svratky a Svitavy.

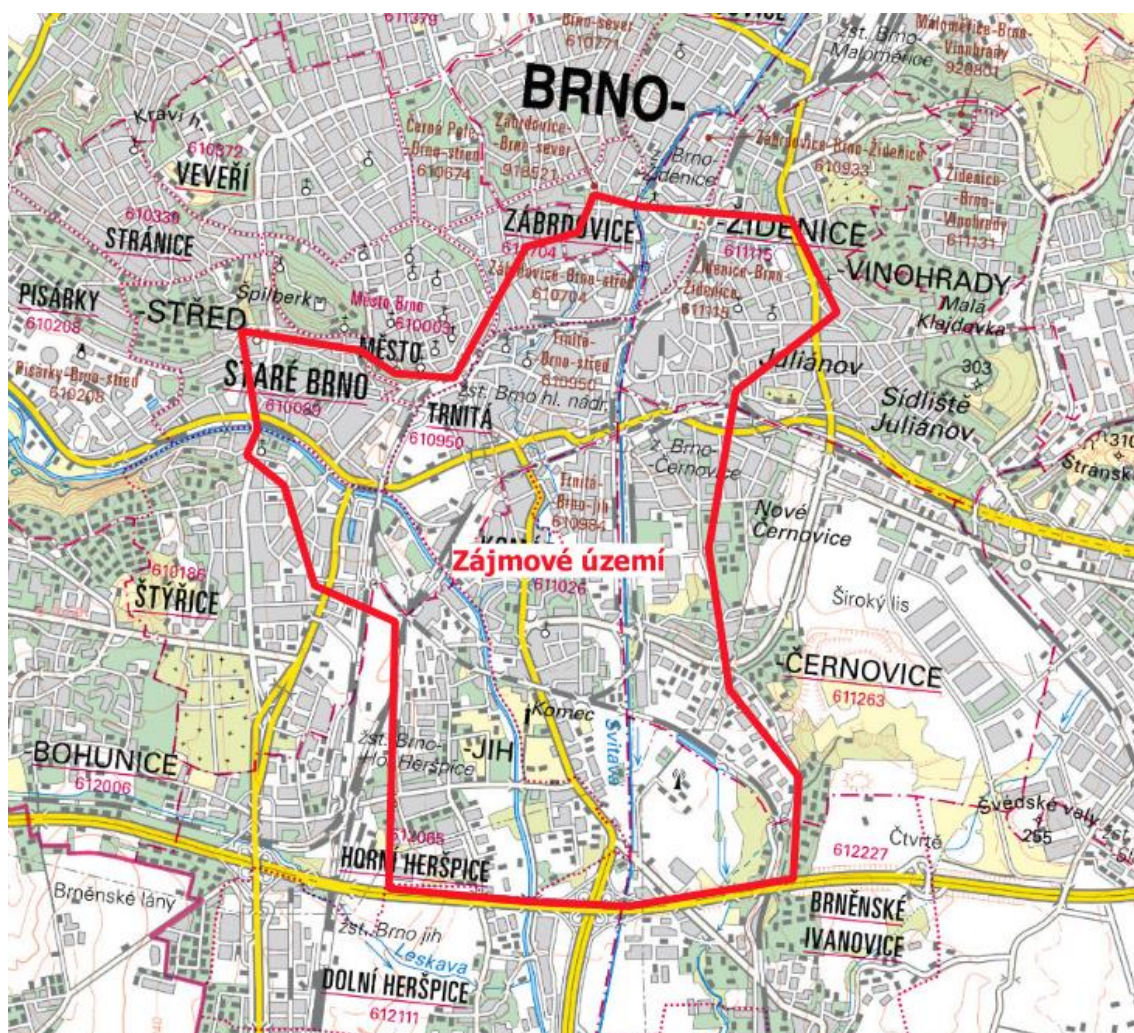
Hlavní cílem bylo vytvoření spřaženého 1D/2D modelu řešených úseků Svratky a Svitavy spolu s přilehlým záplavovým územím. Tento model představuje dílčí část do numerického modelu celého území města Brna, který bude vytvořen z dílčích úseků řešených v jednotlivých diplomových pracích. Pro hydraulické výpočty byl použit volně šiřitelný software BASEMENT ve verzi 2.7. Posuzovány byly celkem 4 varianty pro různé N-letosti kulminačních průtoků.

Výsledky provedených hydraulických výpočtů byly dále zpracovány do podoby map povodňového nebezpečí, tj. rozlivů, hloubek a rychlostí pro jednotlivé povodňové scénáře. Dalším výstupem práce jsou podélné a příčné profily obou toků se zakreslením vypočtených úrovní hladin a fotodokumentace.

3 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

3.1 VYMEZENÍ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

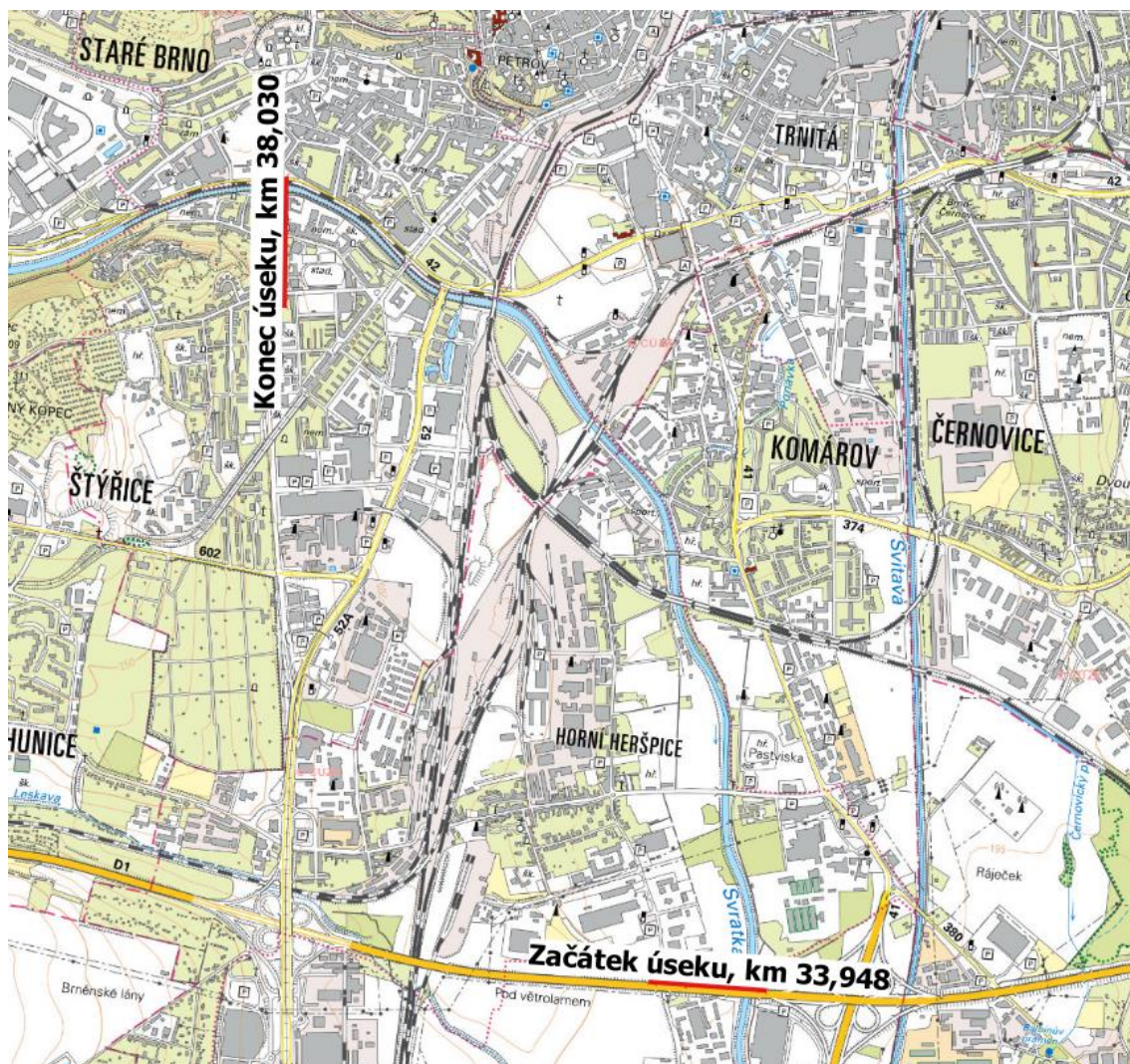
Zájmové území soutokové oblasti řeky Svitavy a Svratky se nachází v Jihomoravském kraji, okrese Brno – město, na území obce Brna. Konkrétněji v městských částech Brno – sever, Brno – střed, Brno – Židenice, Brno – jih, Brno – Černovice a Brno – Tuřany. Staničení používané v této práci vychází z kilometráže podkladů [1], [2]. Začátek řešeného úseku vychází z dříve řešených úseků tak, aby na sebe s přesahem navazovaly. Konec řešeného území pak vychází z vhodných podmínek pro zadání dolní okrajové podmínky.



Obrázek 3-1 Vymezení zájmového území

3.2 VODNÍ TOK SVRATKA

Řešený úsek vodního toku Svatka má celkovou délku 4,082 km. Začátek se nachází v městské části Brno – jih u Dálničního mostu D1, v km 33,948. Konec úseku leží v městské části Brno – střed, a to v km 38,030 pod silničním mostem na ulici Vídeňská. Celkem se na řešeném úseku nachází 14 objektů – 12 mostů či lávek a 2 příčné prahy ve dně. Řeka protéká intravilánem města a v blízkém okolí řeky se nachází obytné, průmyslové, zemědělské i odpočinkové zóny se zelení.



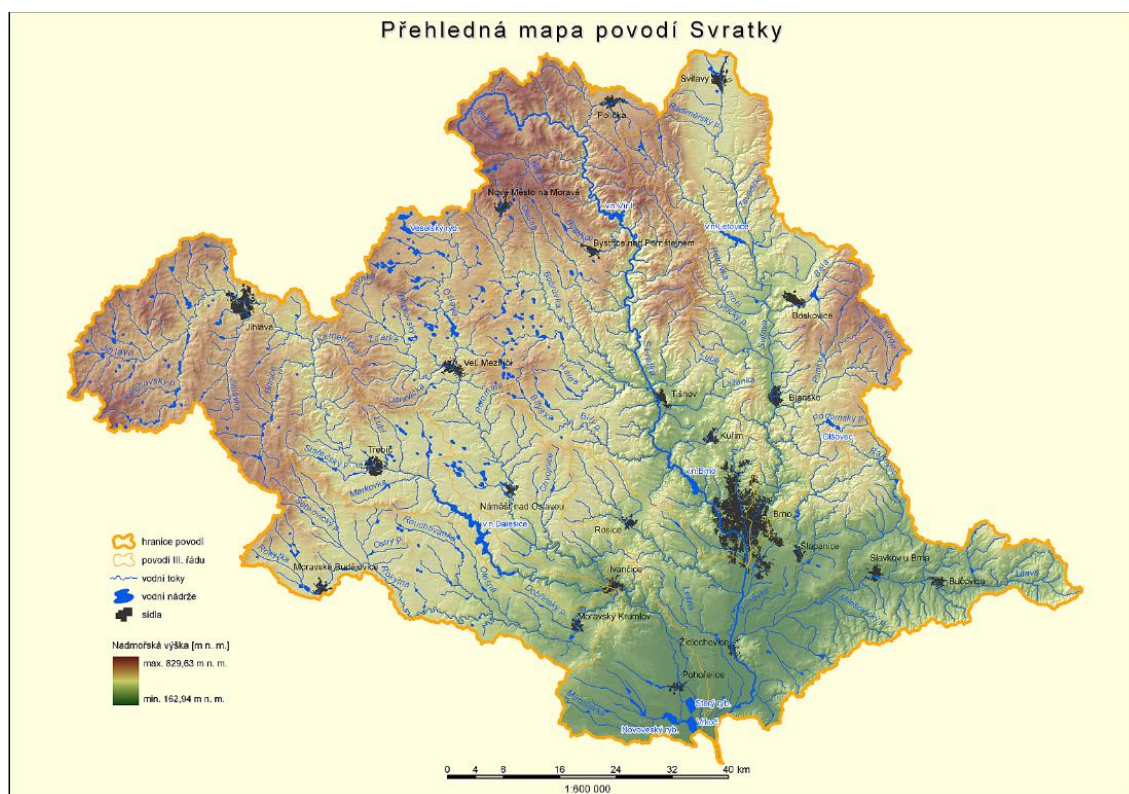
Obrázek 3-2 Řešený úsek Svatky

Řeka Svatka je největším levostranným přítokem Dyje, do které se vlévá ve vodní nádrži Nové Mlýny – střed na jejím 53,190 km ve výšce 162,94 m n. m. [3] Pramen Svatky se nachází na Českomoravské vrchovině pod Žakovou horou v nadmořské výšce 771,93 m, odtud putuje nejprve severovýchodním směrem k obci Borovnice, poté pokračuje

jihovýchodním směrem přes Brno až do Novomlýnské vodní nádrže [4]. Celková délka toku činí 168,49 km a v celé délce je spravována státním podnikem Povodí Moravy.

Nejdelším přítokem je Svitava, dalšími většími přítoky jsou Livava, Fryšávka, Bytřice, Nedvědička nebo Jihlava. V povodí se nachází 4 942 vodních ploch, největší z nich je vodní nádrž Dalešice (462,67 ha) na toku Jihlava. [3]

Plocha povodí až po ústí je 7115,60 km², Nejvýše položený bod – Javořice – má výšku 829,63 m n. m. Nejnižším bodem je s výškou 162,94 m n. m. ústí do vodní nádrže Nové Mlýny. Celkový spád povodí tedy činí 666,69 m, s průměrným sklonem 7,90 ‰. [3]



Obrázek 3-3 Přehledná mapa povodí Svatky [3]

Koryto řešeného úseku řeky Svatky lze z hlediska příčného profilu rozdělit na dva úseky. První úsek od silničního mostu na ulici Vídeňská v km 38,030, až po železniční most v km 37,043 má tvar jednoduchého lichoběžníku. Koryto bylo upraveno již v roce 1853 a je opatřeno betonovými zdmi s povrchovou úpravou z lomového kamene. [5] Šířka ve dně je cca 25–28 m, hloubka okolo 6 m, sklon svahů okolo 1:0,5.

Druhý úsek od železničního mostu v km 37,043 až po dálniční most v km 33,948 má také převážně tvar jednoduchého lichoběžníku, ten je dosažen pouze svahováním terénu.

Opevnění je realizováno pouze v okolí mostních konstrukcí. Šířka koryta ve dně se pohybuje v rozmezí 20-30 m, hloubka cca 4 až 6 m, sklony svahů od 1:1,5 do 1:3,0.

3.2.1 Geomorfologie

Povodí Svatky se nad soutokem se Svitavou rozkládá v celkem čtyřech geomorfologických celcích [6]. Jmenovitě se jedná o Hornosvrateckou vrchovinu, Křižanovskou vrchovinu, Boskovickou brázdu a Bobravskou vrchovinu.

Tabulka 3-1: Seznam geomorfologických jednotek, kterými protéká řeka Svatka

Celek	Podcelek	Okrsek
Hornosvratecká vrchovina	Žďárské vrchy	Devítiskalská vrchovina
Hornosvratecká vrchovina / Železné hory	Žďárské vrchy / Sečská vrchovina	Devítiskalská vrchovina / Kameničská vrchovina
Hornosvratecká vrchovina	Žďárské vrchy	Devítiskalská vrchovina / Borovský les
		Milovská kotlina
		Pohledeckoskalská vrchovina / Borovský les
		Pohledeckoskalská vrchovina
	Žďárské vrchy / Nedvědicí vrchovina	Pohledeckoskalská vrchovina / Sulkovecká vrchovina
	Nedvědicí vrchovina	Pernštejnská vrchovina / Vířská vrchovina
		Pernštejnská vrchovina / Sýkořská hornatina
Boskovická brázda	Oslavanská brázda	Tišnovská kotlina
Křižanovská vrchovina / Boskovická brázda	Bítešská vrchovina / Oslavanská brázda	Deblínská vrchovina / Chudčická pahorkatina
Boskovická brázda	Oslavanská brázda	Veverskobítýšská kotlina
Bobravská vrchovina	Lipovská vrchovina	Trnovka / Omická vrchovina
		Bystrečná kotlina
		Kohoutovická vrchovina / Špilberk
		Žbovřeská kotlina
		Kohoutovická vrchovina
		Pisárecká kotlina
Dyjsko-svratecký úval	Dyjsko-svratecká niva	

Od soutoku se Svitavou se již vodní tok nachází na území geomorfologického celku Dyjsko-svratecký úval.

Pramenná část povodí náleží k Hornosvratecké vrchovině, kudy probíhá i vlastní údolí Svatky [6]. Do Křižanovské vrchoviny zasahují především dílčí povodí Bobrůvky, Libochovky, Haldy a Bílého potoka. U Tišnova vstupuje Svatka do Boskovické brázdy, odkud pokračuje za Veverskou Bítýškou geomorfologickým celkem Bobravské vrchoviny. Ještě v katastru města Brna se spojuje se Svitavou v Dyjsko-svrateckém úvalu. Seznam geomorfologických jednotek, kterými řeka Svatka protéká je na tabulce 3-1.

3.2.2 Tvar povodí a říční síť

Celé povodí Svatky má výrazně asymetrický tvar s páteřním tokem posunutým k východu do blízkosti rozvodí se Svitavou [6]. Výrazněji vyvinutými jsou v povodí pravostranné přítoky. Nejvýznamnějším z nich je Bobrůvka, jejíž povodí zabírá více jak čtvrtinu části povodí Svatky po soutok se Svitavou. V západní části od údolí Svatky je vyvinuta paralelní říční síť s převládajícím směrem odvodňování od severozápadu k jihovýchodu. Na opačné straně se nacházejí pouze kratší přítoky směřující západním či jihozápadním směrem do Svatky. Povodí Svatky po soutok se Svitavou má délku 80 km a maximální šířku 32 km. V pramenné části je široké 22 km, přičemž se směrem k jihovýchodu pozvolna rozšiřuje na svou maximální šířku. Po jejím dosažení se směrem k Brnu opět pozvolna zužuje.

3.2.3 Hydrologické údaje

V zájmové oblasti se nenachází žádná limnigrafická stanice. Ta nejbližší se nachází v km 38,261, což je 231 m nad začátkem řešeného úseku. Jedná se o limnigraf Poříčí umístěný na pravém břehu řeky Svatky [7].

LG Brno – Poříčí

Provozovatel stanice:

ČHMÚ Brno [7]

Centrum automatického sběru dat:
Brno

ČHMÚ Brno, VHD Povodí Moravy

Staničení:

46,80 km

Číslo hydrologického pořadí:	4-15-01-153
Plocha povodí:	1637,16 km ²
Procento plochy povodí toku:	23,00
Nula vodočtu:	197,10 m n. m.

Tabulka 3-2: N-leté průtoky LG Brno – Poříčí [7]

N-leté průtoky	Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
m ³ /s	53	115	150	240	280

Průměrný roční stav:	61 cm
Průměrný roční průtok:	7,76 m ³ /s

Tabulka 3-3: Stupně povodňové aktivity LG Brno – Poříčí [7]

SPA	Vodní stav [cm]	Průtok [m ³ /s]
Bdělost	120	36,5
Pohotovost	160	62,4
Ohrožení	260	144,0

Platnost SPA pro úsek toku:	VD Brno – soutok se Svitavou
-----------------------------	------------------------------

Vzhledem k tomu, že LG Brno – Poříčí se nachází v bezprostřední blízkosti řešeného úseku řeky Svratky, byly hodnoty průtoků pro Q_5 a Q_{100} převzaty z tohoto měrného profilu. Jako zbývající potřebné hodnoty průtoků (pro Q_{20} a $Q_{100,N}$) byly převzaty údaje z podkladů Povodí Moravy, státní podnik [8]. $Q_{100,N}$ značí kulminační průtok stoleté povodně, který není ovlivněn objekty výše na toku, jež dokáží transformovat povodňovou vlnu.

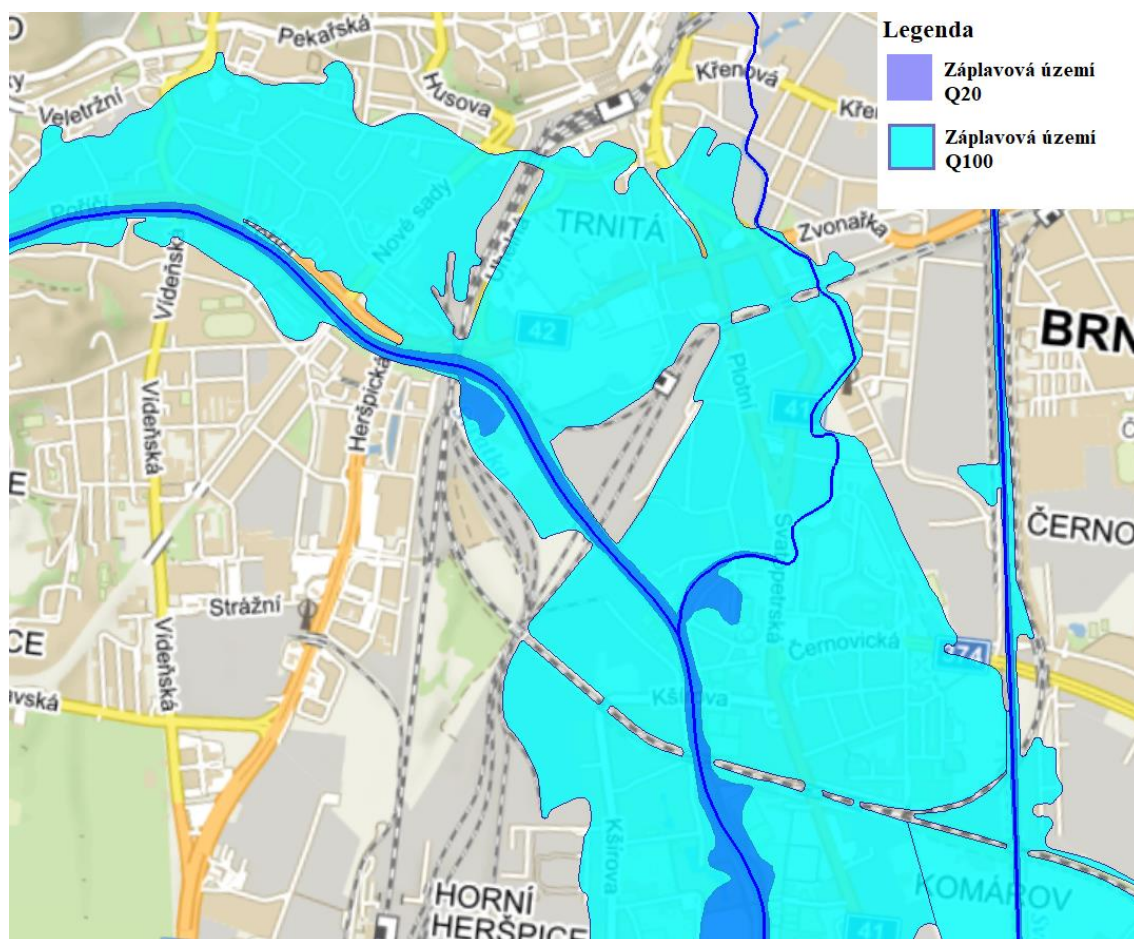
Tabulka 3-4: Hodnoty průtoků použité ve výpočtech, Svratka dle [8] [7]

N-leté průtoky	Q1	Q5	Q20	Q100	Q100,N
m ³ /s	53.00	108.60	177.55	280.00	395.00

3.2.4 Popis z hlediska stávající kapacity koryta

Popis stávajícího stavu kapacity koryta vychází z vyhlášeného záplavového území, které je dostupné z povodňového informačního systému (POVIS) [9].

V horním řešeném úseku má opevněné koryto lichoběžníkového tvaru, až po silniční most na ulici Renneská třída, kapacitu bezpečně převyšující dvacetiletý průtok. Pravý břeh má v tomto úseku o něco větší kapacitu než břeh levý. Nicméně kapacity Q_{100} nedosahuje ani jeden z břehů, a to má za důsledek přelití a zaplavení přilehlého okolí. Rozliv Q_{100} na levém břehu dosahuje téměř po ulici Pekařskou, respektive Husovu a zastavuje se o železniční násep podél ulice Uhelná, kde protéká pouze železničními podjezdy. Pravý břeh v tomto úseku má oproti levému podstatně menší rozliv, a to přibližně po ulici Polní, i tak však zasahuje do zastavěného území. Před mostem ulice Renneská třída se však voda vrací zpět do toku.

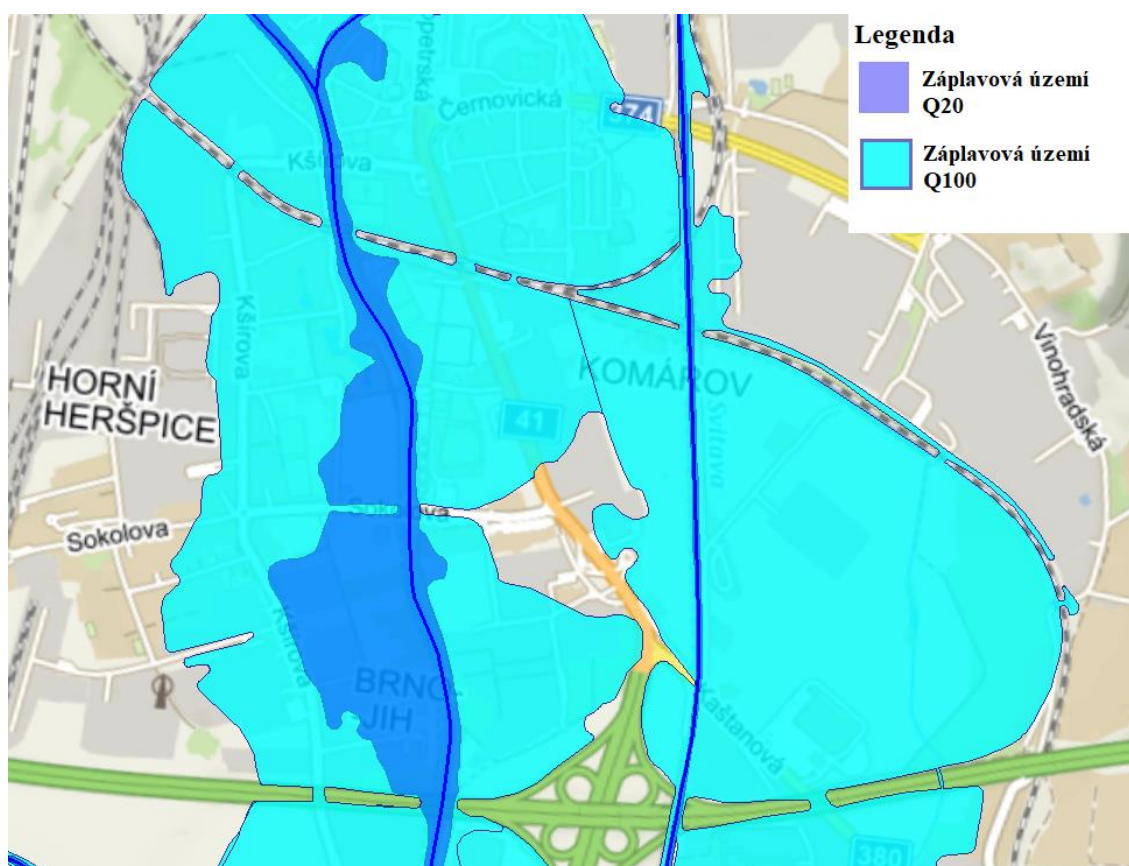


Obrázek 3-4 Záplavové území Svratka, km 38,030 – km 35,574 [9]

Mezi železničními mosty ve staničení km 37,043 a 35,574 je na pravém břehu při průtoku Q_{100} rozliv ohraničen zemními tělesy železničních násypů. Na levém břehu protéká voda

zmiňovaným podjezdem na ulici Úzká, přechází na ulici Dornych až ke korytu Ponávky, která tvoří hranici rozlivu až po ulici Kalová, kde se hranice rozlivu odpojí a pokračuje rovnoběžně s ulicí Za Mostem. Tento průběh pokračuje až k silnici č. 374, za kterou se rozliv rozšíří až ke korytu toku Svitavy, její břehy jsou však vyšší, a proto se voda ze zaplaveného území nezačne přelévat do toku. Až po železniční násep je toto území souvisle vyplněno vodou z průtoku Q_{100} . Před průtokem Q_{20} je tento úsek dobře chráněn. Mírné přelití hrozí pouze v místě zaústění Ponávky, kde se pod vodou ocitne Jeneweinova a Klášterského ulice. Rozlivy v horním úseku jsou patrné z obrázku 3-4.

V posledním úseku mezi železničním mostem v km 35,574 až po dálniční mosty D1 je především pravé inundační území chráněno pouze na pětiletou vodu. Při Q_{20} již pravý břeh kapacitně nedostačuje. Voda však zasahuje víceméně do zelených ploch, kde se nachází například fotbalgolf, minigolf nebo přírodní koupaliště. Toto platí až po ulici Sokolova, která dvacetiletou vodu vrací zpět do koryta. Za mostem je pak rozliv ohraničen ulicí Kšírova. Zaplaveny jsou tak zelené plochy a průmyslové objekty.



Obrázek 3-5 Záplavové území Svatka, km 35,574 – km 33,948 [9]

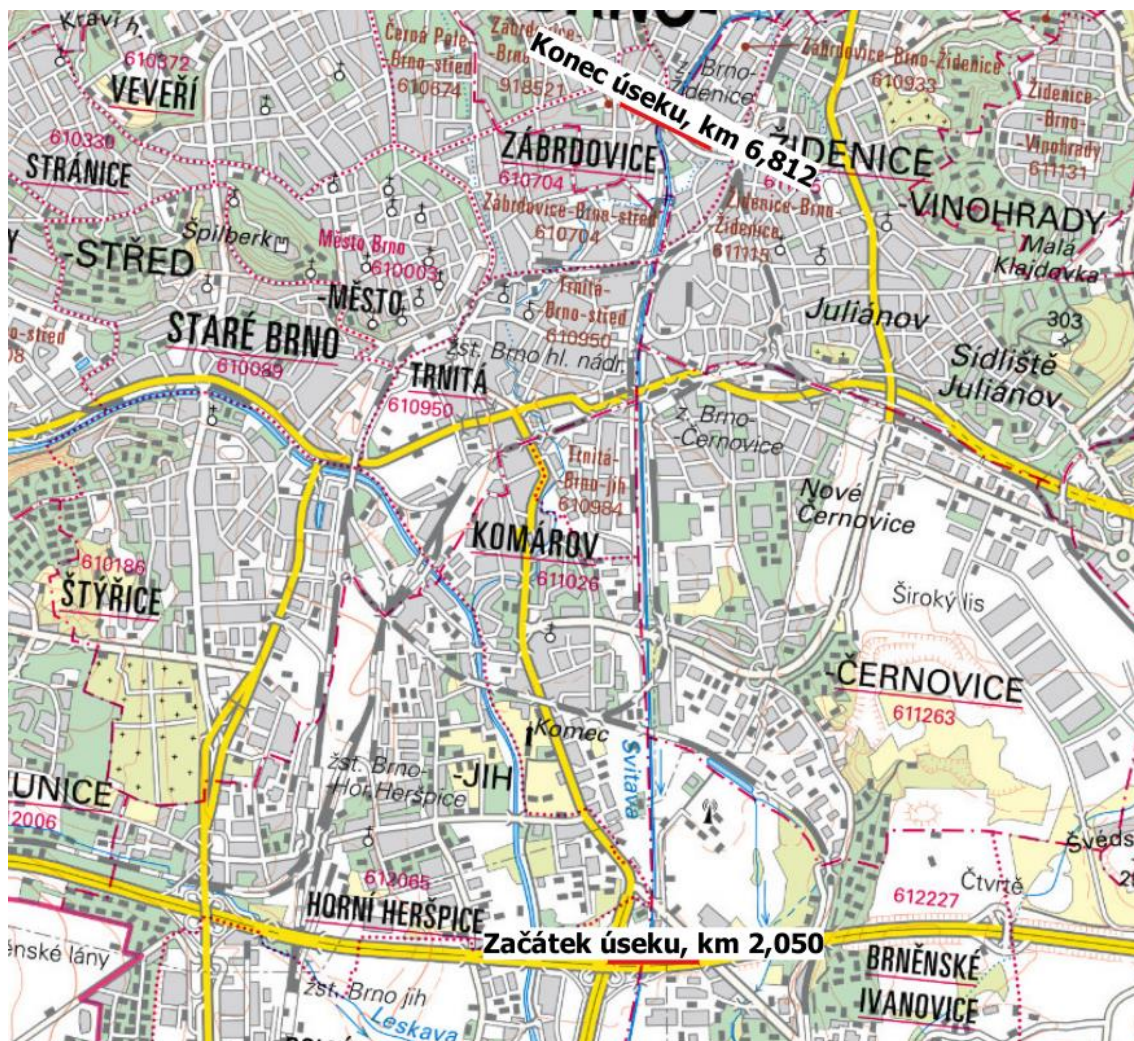
Jedná-li se o stoletou vodu, pak záplavové území dosahuje přibližně na ulici Kšírova, za Sokolovou ulicí se rozliv rozšíří téměř k Bednářově a zastavuje se o dálniční násep, kde se část vody vrací do toku, část putuje dále podjezdem na ulici Kšírova.

Levé inundační území v posledním úseku je poměrně dobře chráněno na dvacetiletou vodu, kdy nedochází k většímu vybřežení. U průtoku Q_{100} se však již setkají záplavová území Svratky a Svitavy a v daném úseku téměř souvisle vyplní území vodou. Výjimku tvoří pouze nájezd na dálnici a malý ostrůvek okolo průniku ulic Hněvkovského a Sokolova. Rozlivy ve spodním úseku jsou ukázány na obrázku 3-5.

3.3 VODNÍ TOK SVITAVA

Řešený úsek vodního toku Svitava je dlouhý 4,762 km. Začátek úseku se nachází v městské části Brno – Tuřany pod dálničním mostem D1, v km 2,050. Konec úseku leží v městské části Brno – Židenice pod mostem na ulici Cejl a má staničení km 6,812. Na daném úseku se vyskytuje 14 mostních konstrukcí či lávek. Stavbou výrazně ovlivňující odtokové poměry je pevný jez Radlas v km 6,424.

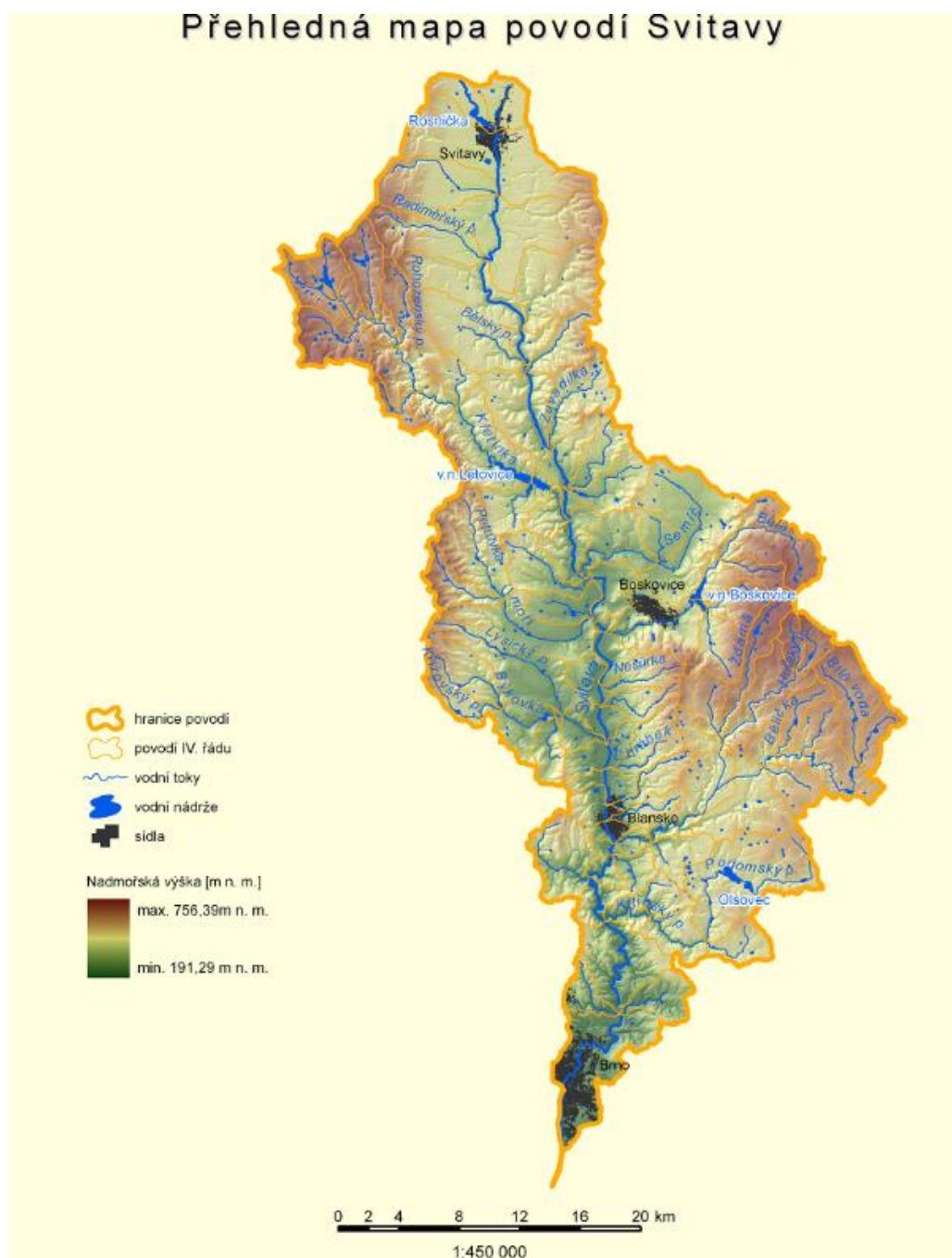
Řeka Svitava je levostranným přítokem Svratky, do které se vlévá v jižní části Brna na jejím 34,970 ř. km. Podle staničení používaného v této práci je to km 31,958. Pramení ve Svitavské pahorkatině přibližně 3 km severozápadně od Svitav [3]. Pramen se nachází ve výšce 471,93 m n. m. Poté co vodní tok proteče město Svitavy, pokračuje dále jižním směrem Českotřebovskou vrchovinou k Letovicím, Blansku až dorazí do města Brna, kde se po 98,39 km stane součástí řeky Svratky. Vodní tok má téměř na 90 % délky toku slon do 5 ‰. Střední sklon toku je 2,85 ‰.



Obrázek 3-6 Řešený úsek Svitavy

Jejím největším přítokem je Křetínka (31,40 km) [3]. Dalšími většími přítoky jsou Bělá nebo Punkva. Celkem se v jejím povodí nachází 583 vodních ploch s celkovou rozlohou 407,49 ha. Největší jsou vodní nádrž Letovice (97,80 ha) a Boskovice (50,97 ha).

Plocha povodí činí 1149,43 km² [3]. Nejvyšším bodem je Kočího kopec s výškou 756,39 m n. m. Nejnižše položeným místem je ústí Svitavy do Svatky s výškou 191,29 m n. m., celkový spád povodí dosahuje 565,10 m s průměrným sklonem 16,67 ‰. Největší podíl ploch (2/3) na území povodí Svitavy dosahuje hodnot 2–15 ‰.



Obrázek 3-7 Přehledná mapa povodí Svitavy [3]

Koryto řeky v řešeném úseku má víceméně stejný charakter v celé délce. Je upraveno na tvar poměrně úzkého, vysokého lichoběžníkového profilu. V několika úsecích se nachází i břehové hrázky. Opevnění břehů se nachází v místech mostních profilů a lávek, dále pak v okolí jezu Radlas. Šířka koryta ve dně se pohybuje v rozmezí 7–15 m. Výška břehových hran se pohybuje okolo 6 m, sklony svahů se pohybují okolo 1:1,5.

3.3.1 Geomorfologie

Z hlediska geomorfologických celků se povodí Svitavy rozkládá ve Svitavské pahorkatině, Boskovické brázdě a Drahanské vrchovině [6]. Pramenná část povodí je na rozdíl od povodí Svatky velice úzká a náleží do geomorfologického celku Svitavská pahorkatina. Na středním toku pak prochází řeka mezi Letovicemi a Rájcem-Jestřebí šikmo Boskovickou brázdou. Dolní tok po Brno odvodňuje především střední a severní část Drahanské vrchoviny, kde se nachází povodí Bělé a Punkvy. Do Svatky ústí Svitava krátce poté, co vstupuje do geomorfologického celku Dyjsko-svratecký úval. Seznam geomorfologických jednotek, kterými řeka protéká, se nachází v tabulce 3-5.

Tabulka 3-5 Seznam geomorfologických jednotek, kterými protéká řeka Svitava [6]

Celek	Podcelek	Okrsek
Svitavská pahorkatina	Českořebovská vrchovina	Kozlovský hřbet
		Ústecká brázda
Boskovická brázda	Malá Haná	Svárovská vrchovina
		Letovická kotlina
		Lysická sníženina
		Krhovský hřbet
Drahanská vrchovina	Adamovská vrchovina	Blanenský prolom
		Soběšická vrchovina / Výškůvka
	Adamovská vrchovina / Moravský kras	Soběšická vrchovina / Ochozské plošiny
	Adamovská vrchovina	Řícmanicko-kanický prolom
		Obřanská kotlina
Dyjsko-svratecký úval	Dyjsko-svratecká niva	

3.3.2 Tvar povodí a říční síť

Pro povodí Svitavy je charakteristický úzký, protáhlý tvar a pérovitá stavba říční sítě [6]. V pramenné oblasti v okolí Svitav je povodí široké přibližně 20 km a směrem k jihu se zužuje až na hodnotu 10 km v okolí Letovic. Větší rozšíření je patrné pouze v úseku mezi

Skalicí nad Svitavou a Blanskem, kde do řeky Svitavy ústí významnější levostranné přítoky Bělou a Punkvu. Povodí zde dosahuje své maximální šířky 26 km. V této části je také značně nesymetrické. Delší jsou levostranné přítoky. Významnějším pravostranným přítokem je pouze Býkovka. Od Blanska až po ústí do Svratky se povodí klínovitě zužuje. Celková délka povodí činí 70 km.

3.3.3 Hydrologické údaje

Na řešeném úseku řeky Svitavy se nenachází žádný limnigraf. Nejbližší limnigrafická stanice se nachází protiproudě cca 9 km, ve staničení km 15,50. Jedná se o měrnou stanici Bílovice nad Svitavou. Profil je umístěn na levém břehu řeky, 20 m pod mostem v Bílovicích [10].

LG Bílovice nad Svitavou

Provozovatel stanice:	ČHMÚ Brno [10]
Centrum automatického sběru dat:	ČHMÚ Brno, VHD Povodí Moravy Brno
Staničení:	15,50 km
Číslo hydrologického pořadí:	4-15-02-109
Plocha povodí:	1119,98 km ²
Procento plochy povodí toku:	97,00
Nula vodočtu:	217,87 m n. m.

Tabulka 3-6: N-leté průtoky LG Bílovice nad Svitavou [10]

N-leté průtoky	Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
m ³ /s	37	61	79	140	180

Průměrný roční stav: 97 cm

Průměrný roční průtok: 4,26 m³/s

Tabulka 3-7: Stupně povodňové aktivity LG Bílovice nad Svitavou [10]

SPA	Vodní stav [cm]	Průtok [m ³ /s]
Bdělost	200	26,5
Pohotovost	270	47,8
Ohrožení	350	77,8

Platnost SPA pro úsek toku:

Adamov – ústí toku

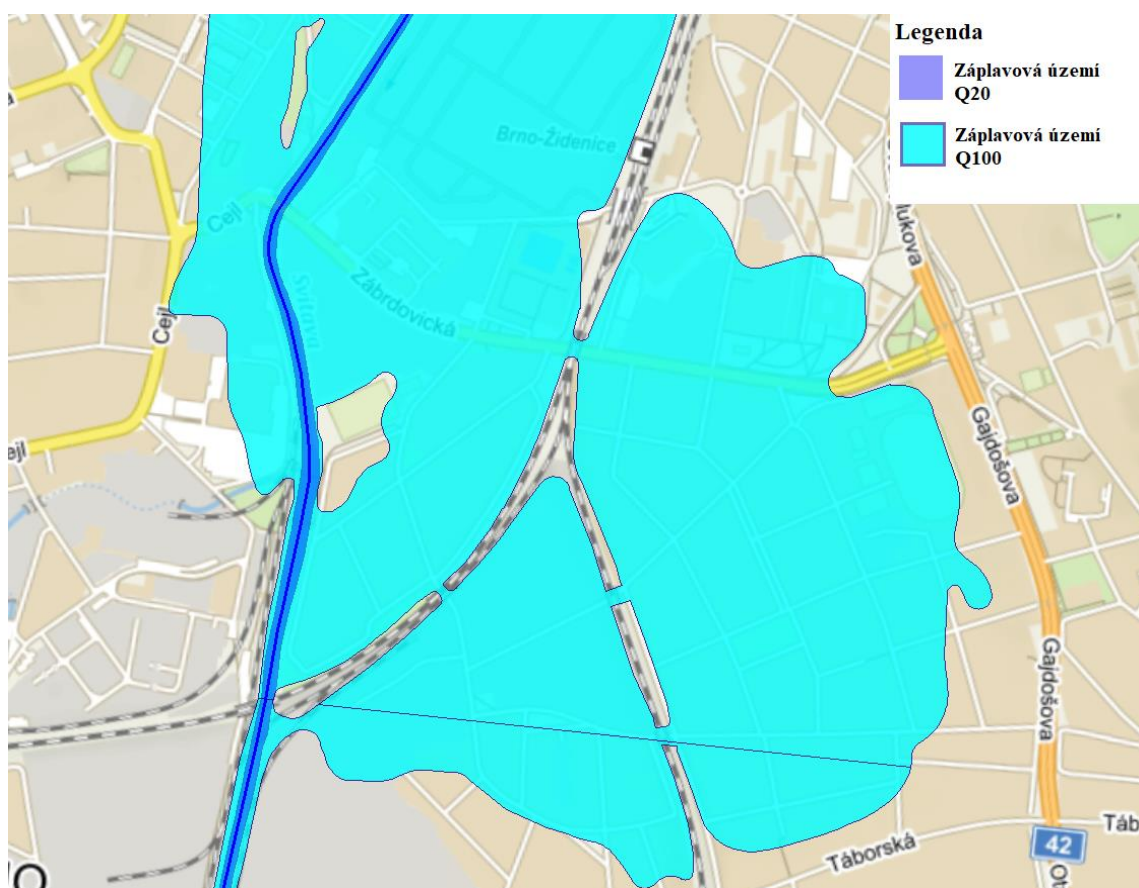
Vzhledem k odlehlosti limnigrafické stanice od řešeného úseku, byly převzaty hodnoty průtoků z podkladů Povodí Moravy, státní podnik [11].

Tabulka 3-8: Hodnoty průtoků použité ve výpočtech, Svitava [11]

N-leté průtoky	Q1	Q5	Q20	Q50	Q100
m ³ /s	40	83	123	154	180

3.3.4 Popis z hlediska stávající kapacity koryta

Popis stávajícího stavu kapacity koryta vychází z vyhlášeného záplavového území, které je dostupné z povodňového informačního systému (POVIS) [9].



Obrázek 3-8 Záplavové území Svitavy, horní úsek [9]

Celý řešený úsek řeky Svitavy je kapacitní na dvacetiletý průtok. Dále bude popsán stav z hlediska kapacity koryta na průtok Q100.

Hned od začátku řešeného území se nacházíme v místě, kde koryto nemá dostatečnou kapacitu na stoletý průtok. Nedostatečná kapacita je však dána spíše vzdutím od pevného jezu Radlas ve staničení km 6,424. Na pravé straně se rozliv propaguje až k Ulici Cejl a poté postupně ustupuje zpět do toku, kam se vrací právě v profilu zmíněného jezu. Levé inundační území s hustou zástavbou je zaplaveno téměř k ulici Gajdošova, přičemž voda protéká průjezdy pod železnicí, které se vyskytují na ulicích Zábrdovická, Šámalova, Filipínského a Jílkova. Voda se začne vracet zpět do toku přibližně podél ulice Tábořská. Pod železničním mostem v km 6,005 je již všechna voda soustředěna do koryta toku a oba břehy Svitavy jsou kapacitní.

Situace se mění až u železničního mostu v km 3,341, kde přestává být kapacitní jak pravý, tak levý břeh. Zde se záplavové území na pravém břehu začne protínat se záplavovým územím Svatky, jak již bylo popsáno výše. Levé záplavové území bezezbytku vyplní prostor ohraničující železniční a dálniční těleso a vodní tok. Voda dále pokračuje dálničním podjezdem na ulici Kaštanová a pod dálničním mostem korytem Svitavy. Rozliv je možné vidět na obrázku 3-5.

3.4 KLIMATICKÉ POMĚRY V POVODÍ SVATKY A SVITAVY

Povodně na Svatce a Svitavě jsou z pohledu meteorologických veličin nejvíce ovlivněny teplotou vzduchu, srážkami a sněhovou pokrývkou.

3.4.1 Teplota vzduchu

Severojižní orientace toků Svatky a Svitavy spolu s celkovými výškovými poměry jsou hlavními faktory ovlivňující teplotní poměry [6]. Významnou roli hraje teplota vzduchu především při povodňových situacích vyskytujících se v zimních měsících. Nejvyšší průměrné roční teploty vzduchu, přes 9 °C, se vyskytují v nejnižší části povodí na soutoku Svatky se Svitavou. Severní část povodí Svatky dosahuje hodnot průměrné roční teploty okolo 5 až 6 °C, oproti tomu jsou horní části povodí Svitavy o něco teplejší, a dosahují průměrných ročních teplot mezi 6 až 7 °C.

3.4.2 Srážky

Na prostorové rozložení atmosférických srážek má rozhodující vliv nadmořská výška a lokální projevy srážkového návětrí a závětrí [6]. Nejnižší průměrné roční úhrny srážek

byly v období mezi lety 1961-2000 pozorovány v oblasti Brna a mezi Tišnovem a Lysicemi. Jednalo se o průměrné roční úhrny pohybující se okolo 500 mm. Tyto úhrny rostou se zvyšující se nadmořskou výškou. Největší průměrné roční úhrny se pak vyskytují v severozápadní části povodí Svratky, kde ročně spadne v průměru více než 750 mm. Maximální hodnoty úhrnů se pak vyskytují typicky v měsíci červnu, kdy se vyskytne v průměru okolo 14 % celkových ročních úhrnů. V průměru 5 % úhrnů se pak spadne v únoru, který se tím stává nejméně mokřím měsícem z pohledu úhrnu srážek.

3.4.3 Sněhové poměry

Průměrné datum výskytu prvního dne se sněhovou pokrývkou připadá v nejvyšších polohách povodí Svratky a Svitavy na první polovinu listopadu, v nejnižších polohách pak tento den přijde v průměru až na konci měsíce [6]. Nejstálejší je sněhová pokrývka v měsíci lednu, kdy ve výše položených oblastech počet dní se sněhovou pokrývkou přesahuje 25 dní. Průměrná maximální výška sněhové pokrývky se pohybuje v rozmezí 10-15 cm v nižších polohách. Se vzrůstající nadmořskou výškou pak přesahují hodnoty 25 cm.

3.5 VODNÍ DÍLA V POVODÍ SVRATKY A SVITAVY

Vodní díla jsou budována na vodních tocích nejčastěji za účelem akumulace či vzdutí vody na daném vodním toku. Hydrologický režim řeky Svratky po soutok se Svitavou je nejvíce ovlivněn manipulací na vodních nádržích Vír I, Vír II a Brno. V případě Svitavy se jedná o nádrže Letovice, ležící na řece Křetínce a Boskovice, vybudované na Bělé [6].

Pro řešení úsek toku Svratky má na odtokové poměry nejvýznamnější vliv vodní nádrž Brno. Stavba tohoto díla, měla jako hlavní cíle zabránit každoročním povodním na řece Svatce a produkovat elektrickou energii. Měla se také stát zásobárnou pitné, užitkové a závlahové vody. Nádrž se podařilo vybudovat po téměř 68 letech od vzniku prvotní myšlenky, a to v roce 1940 [6]. Přehrada z hlediska povodňové ochrany nabízí 2,6 milionů m³ neovladatelného ochranného prostoru.



Obrázek 3-9 Pohled na vodní nádrž Brno [12]

3.6 HISTORICKÉ POVODNĚ

Údaje o historických povodních jsou známy díky provádění systematických měření a zaznamenávání vodních stavů, které byly na území Moravy prováděny od konce 19. století [6]. Jako podklad pro popsání průběhu povodní na Brněnsku slouží především vodoměrné stanice Brno – Pisárky, Brno – Poříčí a Veverská Bítýška na řece Svatce, na řece Svitavě pak stanice Bílovice nad Svitavou.

Z více než 30 povodňových situací v době provádění systematického měření stavů vodních toků budou zde uvedeny dvě poslední, a to z roku 1997 a 2006.

3.6.1 Červenec 1997

Povodeň v roce 1997 zasáhla největší silou Moravu, Slezsko a východní Čechy. Přišla ve dvou vlnách, kdy příčinou první povodně byly vysoké srážkové úhrny [6]. Dne 5. července denní úhrn ve studovaném území přesáhl 80 mm. Významnou roli hrála rychlost

nasycení podloží. Poté již voda nemohla dále vsakovat a odtékala povrchovou cestou. Druhá vlna vydatných srážek dopadla na povodí mezi 17. a 19. červencem, kdy se úhrn pohyboval na celém území okolo 50 mm.

Tato povodeň je považována za nejkatastrofálnější povodeň 20. století v České republice. Přesto však nedosáhla na Brněnsku takové intenzity jako jinde, a to zejména díky tehdejší opravě prosakující hráze Vír I a výstavbě Vířského vodovodu [6]. Voda v nádrži byla totiž v té době snížena o 10 cm, takže byl k dispozici dostatek retenčního prostoru na to, aby se z kulminačního průtoku dosahující hodnoty $128 \text{ m}^3/\text{s}$ nad přehradou zredukoval průtok na neškodných $35 \text{ m}^3/\text{s}$ odtékajících z Víru. Na řece Svitavě však kulminační průtok dosahoval hodnoty přibližně Q_{20} , kdy vodoměrnou stanicí Bílovice nad Svitavou protékalo $125 \text{ m}^3/\text{s}$. Ve druhé vlně nárůstu průtoků již nebyly tyto průtoky překročeny a pohybovaly se na úrovni Q_1 na Svitavě a Q_2 na Svatce.

Dopady povodně v městě Brně nebyly tak katastrofální, jako v jiných částech republiky. I přesto však bylo povodňovým průtokem postiženo celkem osm městských částí, v nichž se pod vodou ocitly skladové a výrobní objekty, ale také přibližně 250 domů, garáže a chaty [6]. Největší škody napáchala rozvodněná řeka Svitava, na které není přímá možnost transformace povodňové vlny manipulací na vodním díle.

3.6.2 Přelom března a dubna 2006

Charakteristickým rysem zimy roku 2006 byla mimořádně dlouhá doba trvání sněhové pokrývky a její neobvyklá mocnost v nižších a středních polohách [6]. Tato mimořádná situace vydržela až do 20. března, kdy bylo celé povodí Svatky i Svitavy pokryto souvislou sněhovou pokrývkou o mocnosti od několika cm po téměř 90 cm. Následné výrazné oteplení, které započalo 25. března, doprovázené deštěm způsobilo rychlé odtávání sněhu. Úhrn srážek byl největší 28. března, kdy na povodí spadlo 14–26 mm. S posledním březnovým dnem roku 2006 zmizel z povodí i poslední sníh.

Po tání sněhu a dešťových srážkách došlo k rychlému růstu průtoků 27. března [6]. O tři dny později byly na stanici Bílovice nad Svitavou zaznamenány maximální průtoky, které dosahovaly hodnot průtoků Q_{10} ($112 \text{ m}^3/\text{s}$), na Svatce pak maximum přišlo 1. dubna, kdy se druhá vlna kulminace zastavila na průtoku odpovídajícím dvacetileté vodě ($230 \text{ m}^3/\text{s}$).

Město Brno bylo záplavami postiženo v Obřanech, kde bylo zaplaveno část Mlýnského nábřeží [6]. Dále byla uzavřena cesta na Bílovice nad Svitavou. Na řece Svatce došlo

pouze k zaplavení zahrádek v městské části Jundrov. Větší škody však napáchala řeka Svitava v Adamově, kde vlivem zaplavení parovodu zůstalo město bez tepla, dále v Blansku, Babicích nad Svitavou a Bílovicích nad Svitavou, kde se voda dostala do patnácti domů.

4 HYDRAULICKÉ VÝPOČTY

Cílem hydraulických výpočtů této práce je posouzení stávajícího stavu povodňového nebezpečí na řešeném úseku toků Svitavy a Svratky a přilehlém záplavovém území. Dále pak porovnání stávajících vyhlášených záplavových území s rozlivy získanými ze spřaženého 1D/2D modelu.

4.1 KONCEPČNÍ MODEL

Koncepční model je soubor účelových zjednodušujících předpokladů skutečnosti, na kterých je založeno praktické modelové řešení. V modelovém prostředí jsou získávány požadované údaje řešením numerického modelu.

Zájmové území, které je řešeno prostřednictvím modelového řešení, se nachází kolem toků Svitavy a Svratky. Na řešeném úseku se nachází dva příčné prahy, které mají vliv na stabilitu dna toku, ale neprojevují se na průběhu hladiny při průchodu větších průtoků. Z tohoto důvodu nebyly v modelu tyto objekty zahrnuty. V zájmovém úseku se nachází také řada mostních konstrukcí, které ovlivňují odtokové poměry v území. Celkem se jedná o 10 silničních nebo železničních mostů či lávek pro pěší. Součástí řešeného úseku řeky Svitavy je pevný jez, který výrazně ovlivňuje odtokové poměry, především vzduutím hladiny proti proudu toku. Jedná se o jez Radlas v km 6,424. Dále se na zkoumaném úseku nachází 14 mostních konstrukcí či lávek.

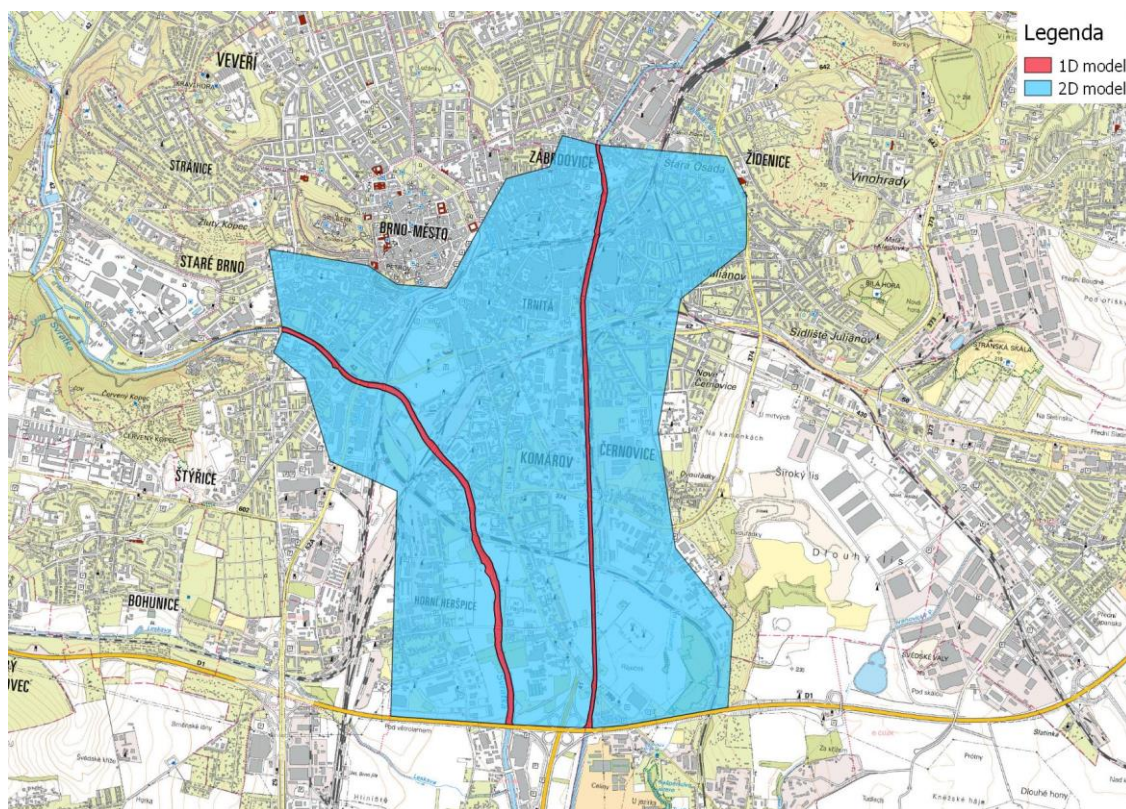


Obrázek 4-1 Jez Radlas, km 6,424

K simulaci proudění vody v korytech toků Svratky a Svitavy a přilehlém zájmovém území byl využit volně dostupný numerický software BASEMENT ve verzi 2.7. Ten je vyvíjen v laboratořích hydrauliky, hydrologie a glaciologie na Spolkové vysoké technické škole v Curychu [13].

Pro zpracování podkladů do požadovaného formátu a struktury posloužily programy Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018, Microsoft Excel 2016 a QGIS verze 2.18 se zásuvnými moduly BASEmesh a Crayfish.

Výběr vhodného modelu závisel na možnostech výpočetního programu a na kvalitě vstupních dat. Program BASEMENT nabízí výpočty v 1D modelu, 2D modelu nebo spřaženém 1D/2D modelu. Vzhledem k dostupným vstupním datům, které obsahovaly příčné profily obou toků po poměrně značných vzdálenostech (místně i 200 metrů), je vhodné řešit koryta řeky 1D modelem. Nejsou zde zaznamenány okamžité místní změny příčného profilu, a proto je použití 2D modelu neopodstatněné. Naopak pro výpočet proudění mimo koryta jsou dostupné podrobnější informace o morfologii terénu díky digitálnímu modelu reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G).



Obrázek 4-2 Schematizace řešené oblasti

Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013. Na základě dostupných podkladů byl tedy zvolen spřažený 1D/2D model. Hranice a zároveň propojení mezi 1D a 2D modelem je tvořena břehovými hranami toků.

Cílem řešení pomocí spřaženého modelu proudění vody je simulovat průchod povodňových průtoků zájmovým územím při současném stavu protipovodňové ochrany.

4.2 MATEMATICKÝ A NUMERICKÝ MODEL

4.2.1 1D model

1D modely jsou vhodné použít v situacích, kdy lze nahradit rychlost proudění střední průřezovou rychlostí a uvažujeme konstantní výšku hladiny v celém profilu. Tyto modely jsou dodnes hojně využívány pro řešení proudění v otevřených korytech, propustcích, na jezích atp. Vhodné použití je zejména u problémů, kde se nevyskytuje výrazné prostorové proudění. Jednorozměrný model má největší výhodu v rychlosti výpočtu.

Matematický model výpočetního programu BASEMENT je založen na řešení Saint-Venantových rovnic, tzn. rovnic spojitosti (4.1) a pohybové rovnice (4.2). Dále jsou použity stavové rovnice a empirické vztahy. Zmíněné rovnice jsou řešeny metodou konečných diferencí [14] [13]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{Q}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g [J_D - J_E]. \quad (4.2)$$

Veličiny objevující se v rovnicích ((4.1) a ((4.2):

Q	průtok	$[\text{m}^3/\text{s}]$,
A	průtočná plocha	$[\text{m}^2]$,
t	čas	$[\text{s}]$,
x	vzdálenost ve směru osy x	$[\text{m}]$,
g	gravitační zrychlení	$[\text{m}/\text{s}^2]$,
h	hloubka vody v profilu	$[\text{m}]$,

J_D	sklon dna	[-],
J_E	sklon čáry energie	[-].

Počáteční podmínky jsou zadány formou známé funkce v jednotlivých bodech výpočtové sítě v čase $t_0 = 0$ s:

$$Q(x_0, t_0) = Q_0(x), \quad (4.3)$$

$$h(x_0, t_0) = h_0(x). \quad (4.4)$$

Rovnice (4.1) a (4.2) jsou dále doplněny o okrajové podmínky, vyjadřující časové průběhy průtoku, popřípadě hloubky vody v krajních bodech:

$$Q(x_0, t) = Q_0'(x), \quad (4.5)$$

$$h(x_L, t) = h_L'(x). \quad (4.6)$$

Cílem je najít hledané neznámé veličiny A , Q , v , h a J_E se splněním počátečních podmínek (4.3), (4.4) a okrajových podmínek (4.5) a (4.6) [13] [14].

V 1D modelu je nutné také řešit objekty na toku. V programu BASEMENT se objekty dají řešit pouze jako jezová nebo stavidlová konstrukce. V našem případě se jednalo o vložení vnitřní okrajové podmínky v podobě jezu, pro jehož přepadové množství používá program rovnici ve tvaru [13]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sigma_z b \sqrt{2gh}^{\frac{3}{2}}, \quad (4.7)$$

kde:

Q	průtok	[m ³ /s],
μ	součinitel přepadu	[-],
σ_z	součinitel zatopení	[-],
b	šířka přelivné hrany	[m],
h	přepadová výška	[m].

4.2.2 2D model

2D model je výhodné uplatňovat při proudění vody v širším inundačním území, kde již nemusí výrazně převažovat proudění vody pouze v jednom směru, jak je tomu u koryta toku, ale voda proudí například kolem překážek, nejčastěji budov, či liniových staveb a odklání se tak od hlavního směru proudu řeky. Oproti 1D modelu je znatelně náročnější na vstupní data, jejich kvalitu a rovněž výpočetní čas.

Výpočet dvourozměrného modelu vychází ze zjednodušených „rovníc mělké vody“ („Shallow water equations“), neboli Saint-Venantových rovnic. Popis proudění zajišťují rovnice kontinuity (4.8) a pohybové rovnice (4.9) a (4.10) ve směru x a y , doplněné o turbulentní model dne Boussinesqa [14] [13]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_y)}{\partial y} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial(hv_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_y v_x)}{\partial y} - fhv_y = \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + \tau_{x,hlad} + \tau_{x,dno}, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(hv_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_y v_x)}{\partial y} - fhv_x = \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + \tau_{y,hlad} + \tau_{y,dno}, \quad (4.10)$$

kde:

H	poloha hladiny	[m],
t	čas	[s],
h	hloubka vody v profilu	[m],
x, y	vzdálenost ve směru osy	[m],
f	Coriolisův parametr	[-],
T	turbulentní smyková napětí	[Pa],
τ	smyková napětí	[Pa].

Počáteční podmínky jsou vyjádřeny jako známé průběhy funkcí $v_{x0}(x, y)$, $v_{y0}(x, y)$ a $h_0(x, y, t)$ ve všech bodech náhradní oblasti Ω v čase $t_0 = 0$ s [13] [14]:

$$v_x(x, y, t_0) = v_{x0}(x, y), \quad (4.11)$$

$$v_y(x, y, t_0) = v_{y0}(x, y), \quad (4.12)$$

$$h(x, y, t_0) = h_0(x, y). \quad (4.13)$$

Okrajové podmínky jsou definovány jako známé průběhy na horní Γ_1 a dolní hranici Γ_2 náhradních oblastí Ω [14] [13]:

$$v_x(x, y, t) = v_x(t) / \Gamma_1, \quad (4.14)$$

$$v_y(x, y, t) = v_y(t) / \Gamma_1, \quad (4.15)$$

$$h(x, y, t) = h(t) / \Gamma_2. \quad (4.16)$$

Hledáme hodnoty neznámých funkcí v_x , v_y a h , které splňují počáteční podmínky (4.11) až (4.13), okrajové podmínky (4.14) až (4.16) a vyhovují rovnicím (4.8) až (4.9) [13] [14].

4.3 VSTUPNÍ DATA

Jako vstupní data numerického modelu, popisující současný stav protipovodňové ochrany zkoumaného zájmového území byly po nezbytných úpravách použity tyto podklady:

- situace vodního toku Svratky a Svitavy [1] [2],
- podélné a příčné profily vodního toku Svratky a Svitavy [15] [8] [16] [11],
- digitální model reliéfu České republiky [17],
- místní šetření zájmového území [18],
- hydrologická data [7] [8] [11],
- vyhlášená záplavová území [9],
- záznamy z historických přirozených povodní [19],
- shapefile polygonů budov v zájmovém území,
- základní mapa, ortofoto [20] [21].

Z výše uvedených podkladů byl poté sestaven numerický model popisující současný stav.

4.3.1 Morfologie zájmového území

Pro získání morfologie vodních toků ve formě, které je nezbytná pro použití v programu BASEMENT, bylo třeba ze zaměřených příčných profilů ve formátu *.dxf [15] [16] přepsat polohy lomových bodů profilu koryta do programu MS Excel 2016. Tyto příčné profily také obsahují informace o objektech na toku, jako jsou mosty, lávky nebo jezy.

Morfologie území přilehlého k vodním tokům byla získána z volně dostupného digitálního modelu reliéfu ČR [17] ve formátu rastru o rozlišení 1,5 m. Významně ovlivňující faktor proudění v modelu jsou budovy, které byly dostupné jako polygonová vrstva ve formátu *.shp.

Úprava geometrie 2D modelu se týkala oprav výšek jednotlivých bodů výpočtové sítě, které neodpovídaly skutečné nadmořské výšce povrchu v daném místě. Přesněji se jednalo o snížení výšek bodů v místě železničních podjezdů, které by bez úpravy tvořili domnělou překážku při proudění vody v inundačním území. Dále proběhla korekce dat v místech, kde se při pořizování digitálního modelu terénu nacházely hluboké stavební jámy. V těchto místech měl totiž výpočetní program problémy se stabilitou výpočtu, jelikož zde byly náhlé změny jak nadmořských výšek, tak sklonu povrchu.

4.3.2 Drsnosti koryt a inundačního území

V modelu jsou údaje o drsnosti zadávány ve formě Manningova drsnostního součinitele. Ty se liší podle typu, respektive drsnosti povrchu, a proto pro inundační území byl rozhodující podklad ortofoto mapa [21].

Tabulka 4-1: Použité hodnoty drsnostního součinitele

Typ povrchu	Materiálový index	Hodnoty součinitele drsností dle Manninga
Koryto Svratka	-	0.040
Koryto Svitava	-	0.042
Komunikace a zpevněné plochy	1	0.018
Zatrávnění a pole	2	0.035
Lesy	3	0.080

Hodnoty drsnosti jednotlivých ploch jsou přiřazovány na základě příslušného materiálového indexu. Hodnota součinitele drsnosti pro koryta byla zvolena na základě kalibrace. Užívané hodnoty viz Tabulka 4-1: Použité hodnoty drsnostního součinitele.



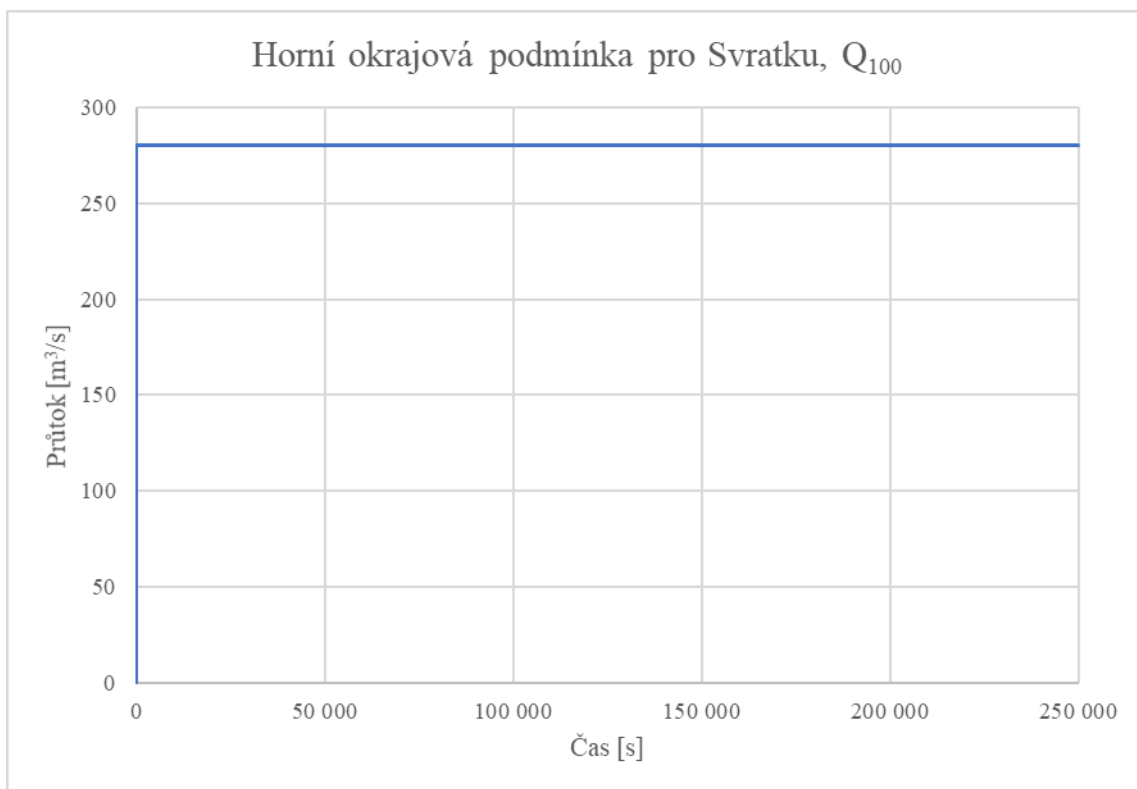
Obrázek 4-3 Oblasti zájmového území rozdělené dle materiálového indexu

4.3.3 Okrajové podmínky

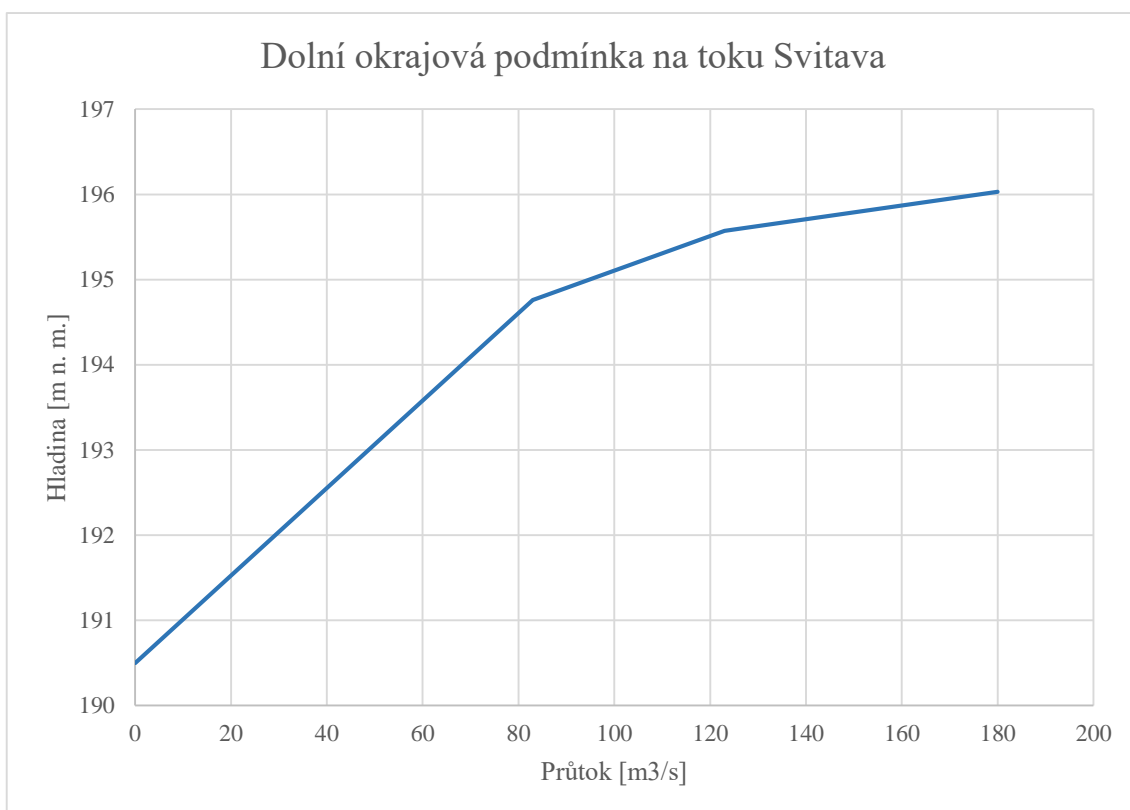
Okrajové podmínky pro výpočet se zadávaly na dvou hranicích. Horní okrajovou podmínku tvořil hydrogram daného toku pro hodnoty řešených kulminačních průtoků Q_5 , Q_{20} , Q_{100} a $Q_{100,N}$ s dostatečně dlouhou dobou trvání vzhledem k délce trvání výpočtu a potřebné době pro ustálení výpočtu. Program BASEMENT je totiž schopen řešit pouze neustálené proudění. Ustáleného stavu se docílí tak, že se výpočet spustí na dostatečně dlouhou dobu, aby se vyrovnal přítok a odtok z řešené oblasti. Hodnoty N-letých průtoků viz Tabulka 3-4 a Tabulka 3-8.

Dolní okrajovou podmínku tvoří měrná křivka posledního příčného profilu řešeného úseku toku. Ta vycházela ze známé nadmořské výšky hladiny při daném kulminačním průtoku, získané z podélných profilů toků [8] [11].

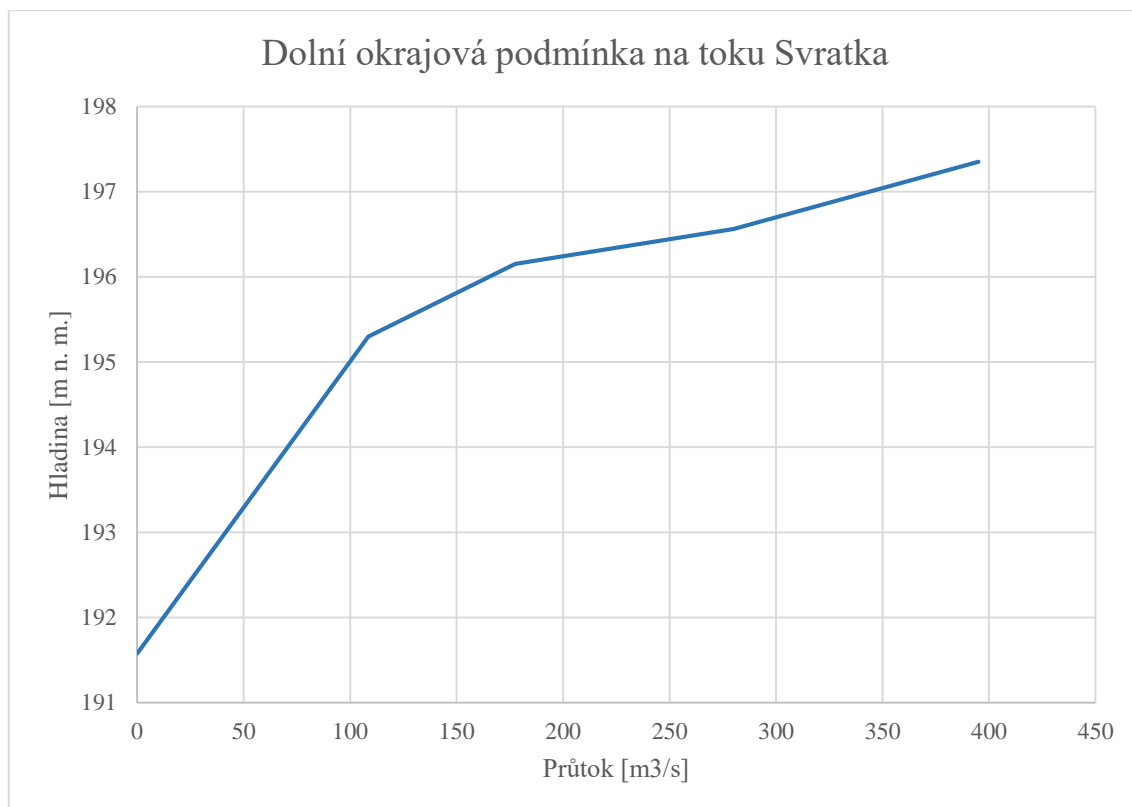
Díky volbě polohy okrajové podmínky, není třeba zadávat okrajové podmínky na 2D oblasti, postačí zadané okrajové podmínky pouze na jednorozměrném modelu.



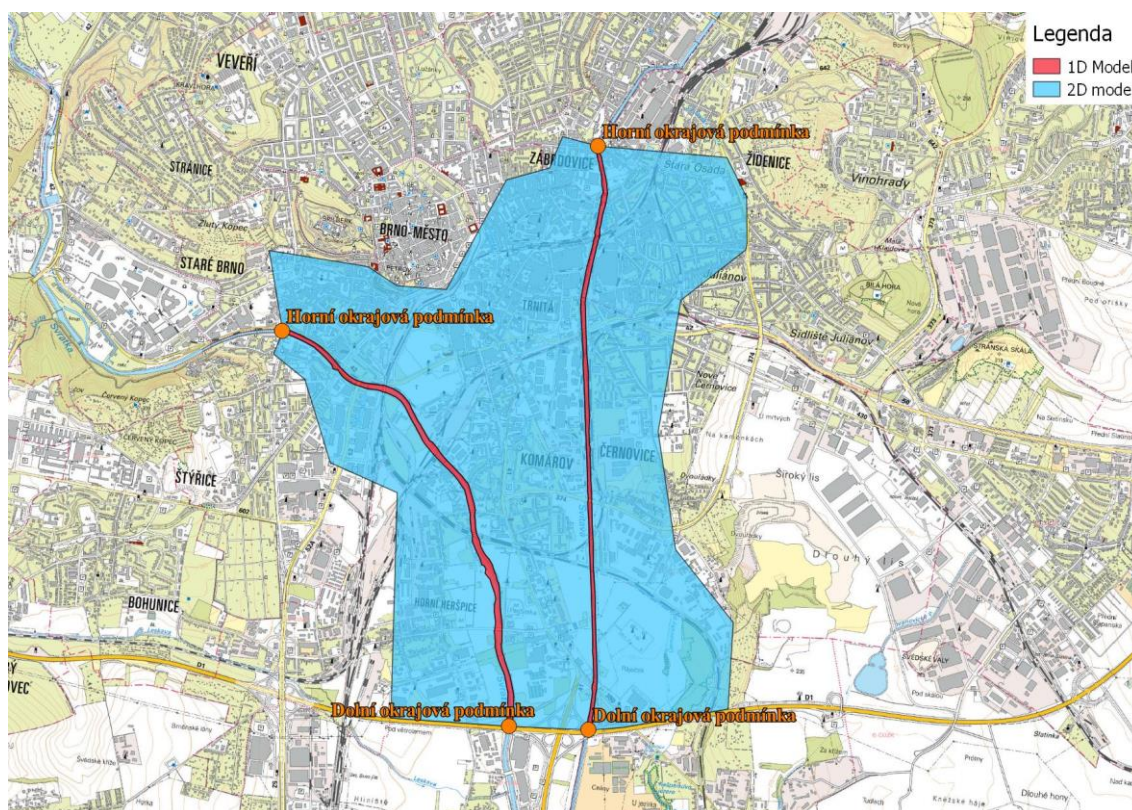
Obrázek 4-4 Horní okrajová podmínka ve formě hydrogramu



Obrázek 4-5 Dolní okrajová podmínka na toku Svitava



Obrázek 4-6 Dolní okrajová podmínka na toku Svratka



Obrázek 4-7 Zadání okrajových podmínek modelu

4.3.4 Počáteční podmínky

Ve výpočtech byly použity dva typy počátečních podmínek. První z nich byl výpočet, který předpokládá v čase $t = 0$ s suché koryto. Tohoto přístupu bylo použito při prvních výpočtech jednotlivých N-letostí. Koryto se postupně zaplní vodou a je tak vyloučena možnost, kdy by se voda mohla dostat do míst, kde není překročena kapacita koryta vodního toku. Tento přístup je však náročný na výpočet, a proto se v dalších fázích výpočtu užívá druhého typu počáteční podmínky, která vychází z dříve vypočtených úrovní hladiny jak v korytě toku, tak v jednotlivých elementech výpočtové sítě. Díky možnosti navázání na předchozí výpočty lze dosáhnout ustáleného stavu.

4.4 NEJISTOTY VSTUPNÍCH DAT

Jelikož je model pouze účelovým zjednodušením reálného světa, je nutné počítat s určitou mírou nejistot, týkajících se nejen vstupních údajů modelu – morfologie, hydrologické údaje, součinitelé drsností. Hlavními zdroji nejistot tedy jsou:

- velikost elementu výpočetní sítě,
- digitální model terénu,
- volba součinitele drsnosti,
- hydrologická data.

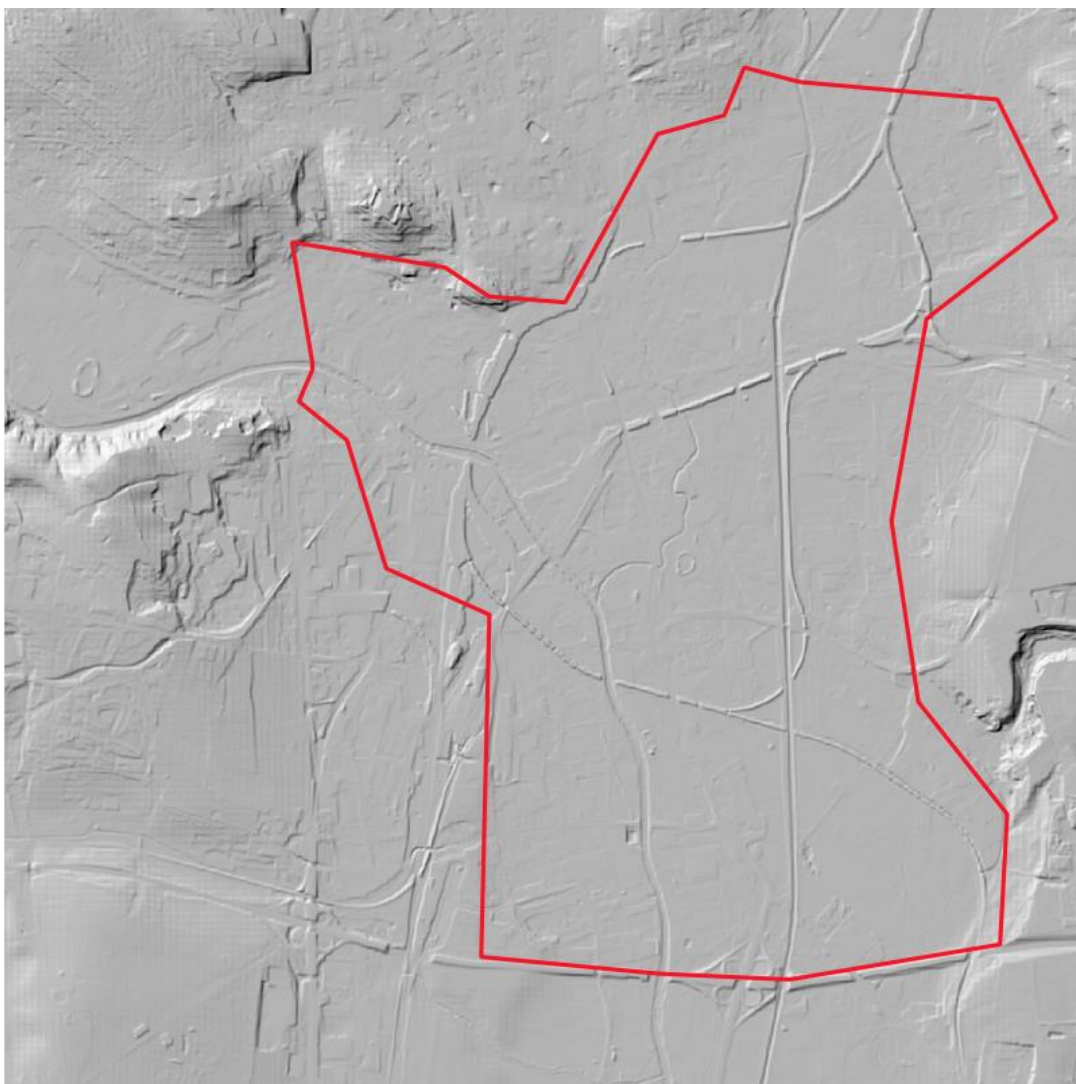
4.4.1 Velikost elementu výpočetní sítě

Velikost elementu výpočetní sítě má zásadní vliv na výslednou přesnost modelu. Čím menší velikost elementu zvolíme, tím dostaneme kvalitnější výstupy. Zároveň však značně prodloužíme dobu výpočtu a zvýšíme nároky na výpočetní hardware. Velikost elementu rovněž závisí na kvalitě dalších vstupů, v našem případě se jedná o digitální model terénu. Zvolením velikosti elementu menší, než je rozlišení dat modelu terénu již nedosáhneme žádného výraznějšího zpřesnění výpočtu. Z důvodu optimalizace doby výpočtu byla ve dvourozměrné oblasti modelu zvolena maximální plocha elementu 40 m².

4.4.2 Digitální model terénu

Použitý model 5. generace, který vznikl v letech 2009 až 2013 metodou leteckého laserového skenování výškopisu, má úplnou střední chybu výšky 0,18 m v okrytém terénu

a 0,30 m v zalesněném terénu, přičemž představuje zobrazení zemského povrchu ve formě diskretních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti [17]. Proto není zdrojem nejistot ani tak přesnost a podrobnost tohoto modelu, jako spíše nutnost převést data do rastrového formátu, který dále umožní přiřadit výšky jednotlivým uzlům výpočetní sítě. Pro účely této práce byl vytvořen rastr s velikostí buňky 1,5 m.



Obrázek 4-8 Stínovaný reliéf terénu získaný z digitálního modelu terénu 5. generace [17]

4.4.3 Součinitel drnosti

Dalším významným faktorem ovlivňující výsledky daného numerického modelu je součinitel drnosti. Ty jsou závislé na mnoha faktorech, ať se jedná o roční či vegetační období, stáří opevnění koryta, zanášení či vymílání koryta, místní překážky a tak podobně. Nejvhodnější by bylo vyhotovit výpočty pro minimální a maximální hodnoty

součinitelů drsností, tím by se však zdvojnásobil počet výstupů, a hlavně potřebný výpočetní čas, proto se přistoupilo k výpočtu se středními hodnotami součinitele.

4.4.4 Hydrologická data

Nejistoty v hydrologických údajích závisí na třídě přesnosti dostupných podkladů. Český hydrometeorologický ústav v souladu s ČSN 75 1400 poskytuje informace o velikosti a průměrné době opakování průtoků. Údaje jsou rozděleny do čtyř spolehlivostních tříd, kterým odpovídají příslušné hodnoty středních kvadratických chyb. Pro průtoky s dobou opakování větší než 1 rok, ale menší než dvacet let, je střední kvadratická chyba max. 40 %. Pro doby opakování větší než 20 let je střední kvadratická chyba max. 60 % [14].

4.5 KALIBRACE MODELU

Cílem kalibrace vstupních dat je dosažení co možná nejlepší shody mezi výsledky výpočtů modelu a reálným stavem. Kalibrace je tedy v podstatě oprava vstupních hodnot numerického modelu.

1D model byl kalibrován z hlediska již zmíněných drsností koryta. Dále pak bylo třeba snížit míru vzduť nad pevným jezem Radlas tak, aby kapacita koryta byla v souladu s údaji z historické povodně z roku 1997 [19], kdy průtok odpovídal přibližně dvacetiletému kulminačnímu průtoku. Toho bylo dosaženo zvýšením přepadového součinitele.

5 POSTUP ŘEŠENÍ V PROGRAMU BASEMENT

Pro řešení simulace proudění vody byl využit volně dostupný numerický simulační software BASEMENT, ten je vyvíjen v laboratořích hydrauliky, hydrologie a glaciologie na Spolkové vysoké technické škole v Curychu. První veřejná verze programu spatřila světlo světa v roce 2006 [22]. Zatím poslední verze BASEMENT v 2.7 byla vydána 1. února 2017.

Program je zaměřen na simulaci proudění v otevřených korytech a simulaci průtoku splavenin i plavenin [13]. To vše lze řešit v jednorozměrném, dvourozměrném nebo 1D/2D spřaženém modelovém prostředí. Tvůrci programu se zaměřovali především na stabilitu numerického modelu, flexibilitu v tvorbě výpočtové sítě a efektivitu metody výpočtu díky možnosti spuštění výpočtu na více procesorových jádrech.

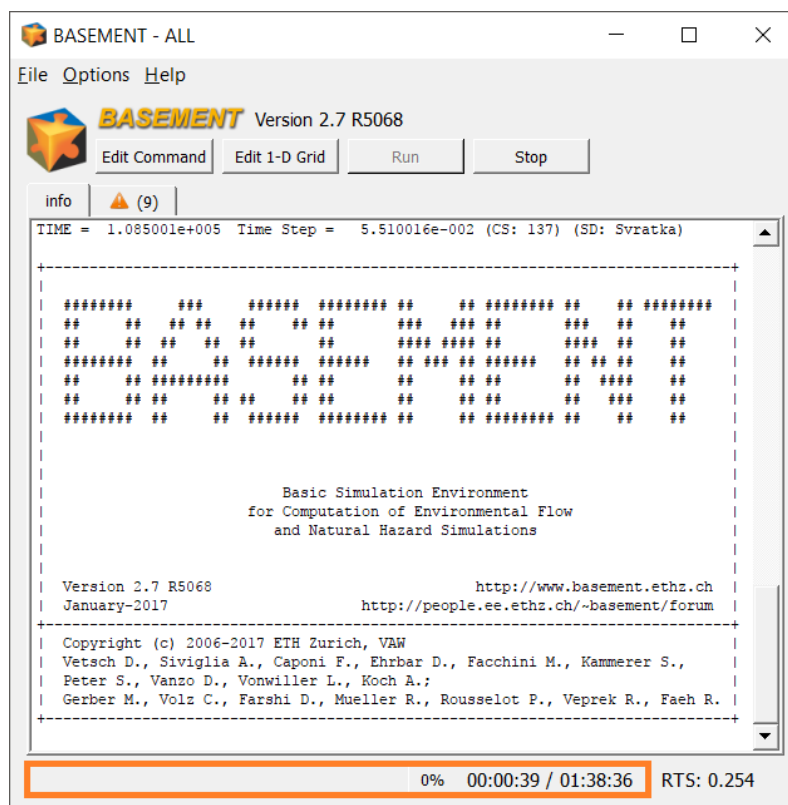
V prostředí programu BASEMENT se odehrává pouze sestavení potřebných částí modelu a výpočet. Příprava vstupních dat je realizována v prostředí programu QGIS, s pomocí zásuvných modulů BASEmesh a Crayfish. Stejně tak vizualizace výsledků je možná pouze v prostředí programu QGIS, což je volně dostupný open source geografický informační systém.

5.1 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ

Základní uživatelské prostředí programu je jednoduché dialogové okno se čtyřmi funkčními tlačítky. První z nich slouží pro otevření prostředí „příkazu“, pro vytváření struktury výpočtového modelu. Druhé tlačítko v pořadí slouží k prohlížení a editaci geometrie jednorozměrného modelu. Třetím tlačítkem se po nadefinování všech částí modelu spustí výpočet a posledním tlačítkem „stop“ se výpočet může kdykoliv zastavit a vygenerovat tak výstupní soubory. Na obrázku 5-1 je také zvýrazněna oblast, kde se ukazuje postup výpočtu. Vpravo od tohoto místa se nachází údaje o čase výpočtu uplynulém a celkovém.

Po vytvoření souboru příkazu (command) se již začne objevovat stromová struktura příkazu typická pro program BASEMENT, která se nachází v levé části okna. Základními jednotkami jsou tzv. bloky a tagy. Skládání těchto jednotek slouží k nadefinování parametrů příkazu výpočtu, a jejich přidávání se realizuje v pravé části okna.

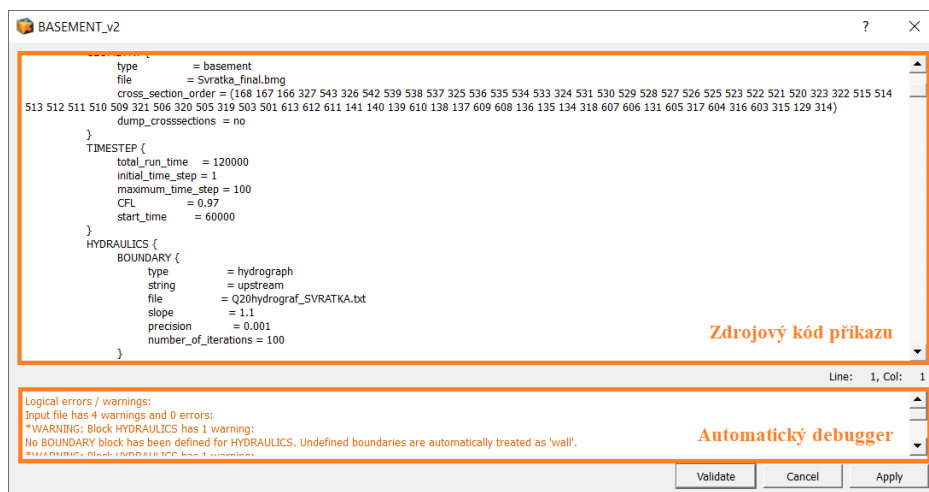
Do jednoho příkazového souboru lze nadefinovat jak jednotlivé modelové prostředí jednorozměrné či dvourozměrné, tak i více 1D či 2D oblastí, popřípadě lze pomocí nadefinování propojovacích souborů vytvořit spřažený 1D/2D model.



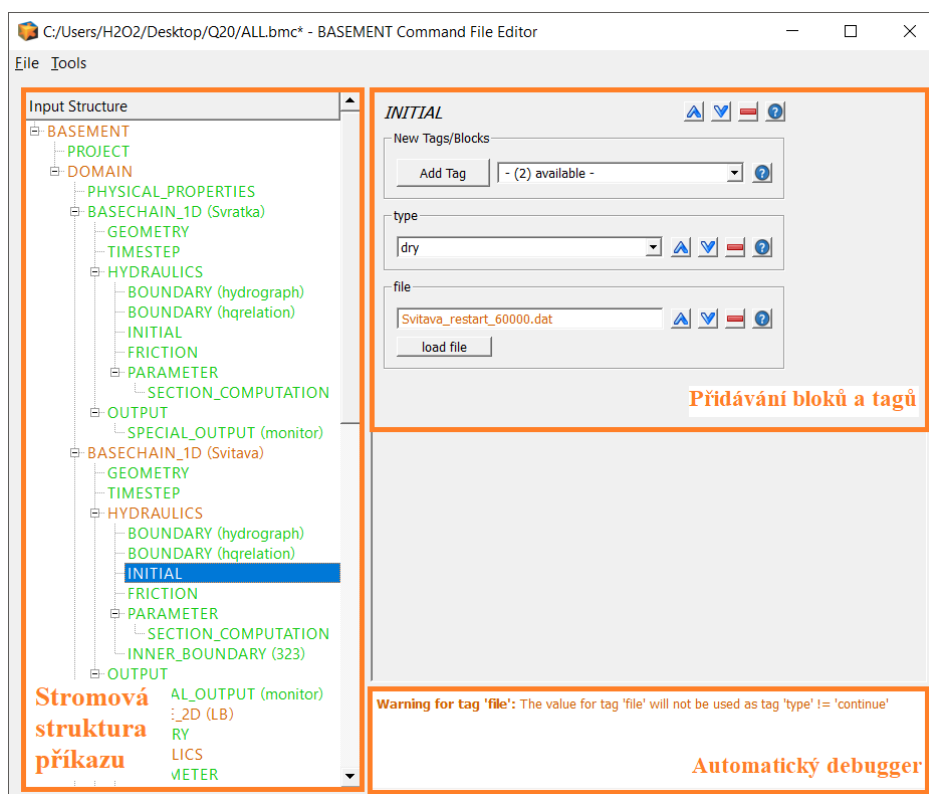
Obrázek 5-1 Základní prostředí programu BASEMENT

Důležitou součástí programu BASEMENT je tzv. debugger, který se nachází v pravé dolní části při editaci příkazu. Debugger automaticky upozorní na chybějící či špatně zadaný blok či tag. Další důležitý prvek programu BASEMENT nalezneme po rozbalení nabídky „Tools“ v hlavní nabídce. Jedná se o nástroj „Edit Raw“, který umožňuje zobrazit zdrojový kód daného příkazu a jeho editaci.

Bylo nutné postupně vytvořit samostatnou verzi příkazového souboru pro každý posuzovaný kulminační průtok. Ty se pak lišily v zadaných okrajových podmínkách v podobě hydrogramů a měrných křivek jednotlivých profilů na obou vodních tocích.



Obrázek 5-2 Zdrojový kód příkazu



Obrázek 5-3 Prostředí vytváření příkazového souboru

Finální struktura příkazového souboru je ukázána v tabulce 5-1. Nejsou zobrazeny části, které by se již opakovaly. Finální příkazový soubor tedy obsahoval dva jednorozměrné modely (koryto řeky Svatky a Svitavy) a tři 2D oblasti (pravý břeh řeky Svatky „PB“, území rozkládající se mezi řekou Svatkou a Svitavou „STRED“ a levý břeh řeky Svitavy „LB“).

Tabulka 5-1 Obsah finální verze příkazového souboru

PROJECT	základní údaje o projektu: název, autor, datum, ...
DOMAIN	
PHYSICAL PROPERTIES	fyzikální vlastnosti: kinematická viskozita, gravitační zrychlení, hustota kapaliny
BASECHAIN 1D	blok 1D modelu
GEOMETRY	geometrie daného 1D modelu, pořadí příčných profilů
TIMESTEP	specifikace časových parametrů jako je celkový čas výpočtu, časový krok, ...
HYDRAULICS	stanovení okrajových, počátečních podmínek, zadání drsnosti, vnitřních okrajových podmínek (jez)
OUTPUT	volba formy a časového kroku výstupu výpočtů
BASEPLANE 2D	blok 2D modelu
GEOMETRY	geometrie daného 2D modelu
HYDRAULICS	zadání počátečních podmínek a drsností
TIMESTEP	specifikace časových parametrů: celkový čas výpočtu, časový krok, počáteční čas, ...
OUTPUT	specifikace typu, formy a časového kroku výstupů
COUPLINGS	spřažení 1D a 2D oblastí
COUPLING LATERAL	určení párovaných oblastí, zadání přepadového součinitele, určení párovacího souboru
PARALLEL	nastavení počtu procesorových jader, které budou k dispozici pro výpočet

5.2 GEOMETRIE PRO 1D MODEL

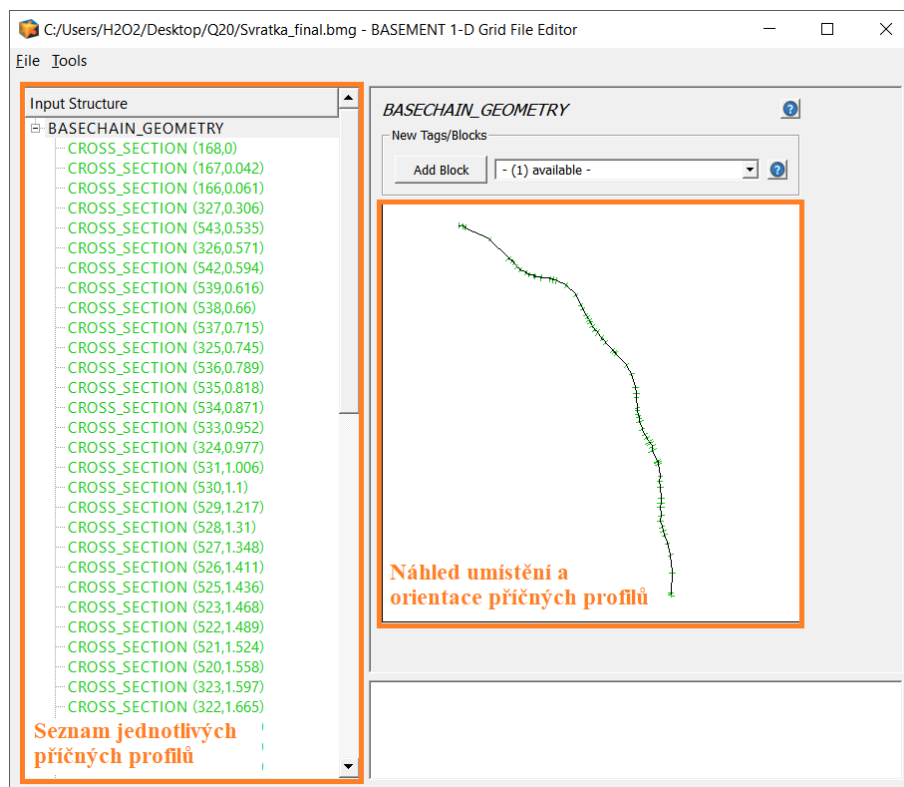
Geometrie pro 1D oblast byla vytvořena samostatně pro řeku Svratku a Svitavu. Protože vytváření souboru geometrie v prostředí programu BASEMENT by bylo zdouhavé a značně nepohodlné, byl soubor vytvořen s pomocí programu MS EXCEL 2016 a Poznámkového bloku ve formě zdrojového kódu a následně byl nahrán do příkazového souboru numerického modelu ve formátu *.bmg.

Vstupní data pro geometrii 1D modelu tvořily poskytnuté zaměřené příčné profily toků [15] a [16]. V řešeném úseku bylo k dispozici pro řeku Svratku celkem 69 příčných profilů na úseku dlouhém 4,082 km. Bohužel některé příčné profily byly od sebe vzdáleny přes 200 metrů, a proto není zachycen průběh změny příčného profilu po délce toku. Na řece Svitavě se v řešeném úseku dlouhém 4,762 km nacházelo 67 a příčné profily zde byly místy ještě více vzdálené.

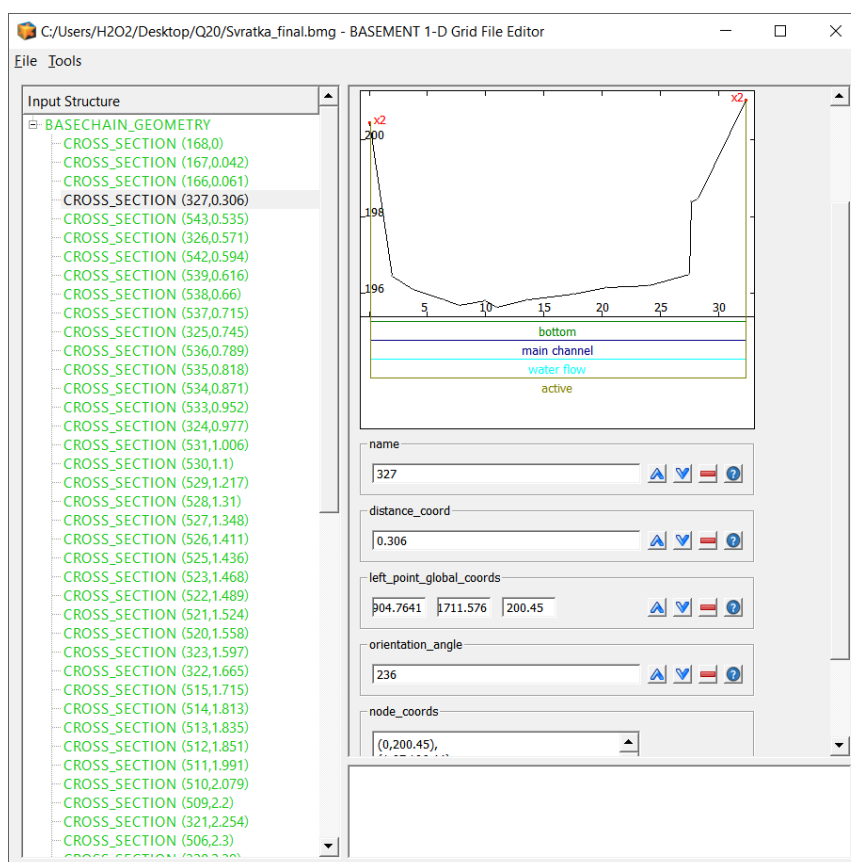
Z příčných profilů bylo třeba získat údaje o tvaru profilu v podobě staničení od levého břehu a příslušné výšky. Dále bylo použito ortofoto mapy a programu Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018 pro získání souřadnice levého břehu příčného profilu v systému S-JTSK a úhlovou orientaci natočení příčného profilu.

V prostředí programu BASEMENT je možná kontrola správnosti zadaných geometrických dat a jejich editace pomocí nástroje „1-D Grid Editor“, který je vidět na obrázku 5-4. Postup vytváření nebo editace je obdobný, jako postup vytváření příkazového souboru. I zde se využívá bloků a tagů.

Po rozkliknutí jednotlivých příčných profilů pak vidíme jeho náhled, dále jsou zde informace o názvu profilu, vzdálenosti od prvního horního profilu, souřadnice levého břehu, orientace a údaje o jednotlivých bodech příčného profilu. Dále zde mohou být informace o drsnosti, vlastností zeminy a tak podobně.



Obrázek 5-4 Editace a prohlížení 1D geometrie



Obrázek 5-5 Ukázka zadávání příčného profilu

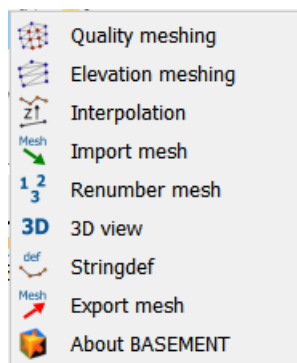
5.3 GEOMETRIE 2D MODELU

Geometrie 2D modelu se do příkazového souboru nahrává jako soubor ve formátu *.2dm. Vytváření souboru zahrnuje řadu nezbytně nutných kroků. Celý proces vytváření se odehrává v prostředí programu QGIS.

Prvním krokem je určení rozsahu dvourozměrné oblasti. Bylo nutné znát přibližné hranice rozlivů. Hranice zájmového území byla určena mírně za hranicí záplavového území kulminačního průtoku Q_{500} , která je k dispozici k nahlédnutí na stránkách centrálního datového skladu [23]. Byly vytvořeny celkem 3 oblasti: pravý břeh řeky Svratky, střední oblast mezi vodními toky a levý břeh Svitavy.

Jakmile je jasný rozsah řešeného území, je nutné si připravit soubor s liniemi obrysů budov, které se nacházejí v daném území a s liniemi, které tvoří rozhraní mezi oblastmi s různou drsností. Důležitý je také soubor obsahující bodové informace o vlastnostech jednotlivých regionů jako je budoucí maximální velikost elementu nebo index drsnosti. Třetím podkladem pro pozdější vytvoření výpočtové sítě (meshe) je rastrová vrstva výšek terénu, získaná z digitálního modelu terénu. Jsou-li všechny tyto podklady připraveny, je možné přistoupit k tvorbě výpočetní sítě.

K tvorbě výpočtové sítě slouží zásuvný modul programu QGIS s názvem BASEmesh. Jeho jednotlivé komponenty jsou zobrazeny na obrázku 5-6.



Obrázek 5-6 Funkce zásuvného modulu BASEmesh

Výpočetní síť se vždy skládá ze dvou souborů. Jeden obsahuje trojúhelníkové elementy a v druhém jsou obsaženy informace o jednotlivých bodech sítě. Pro vytvoření těchto souborů je možné využít více postupů:

- Elevation mesh

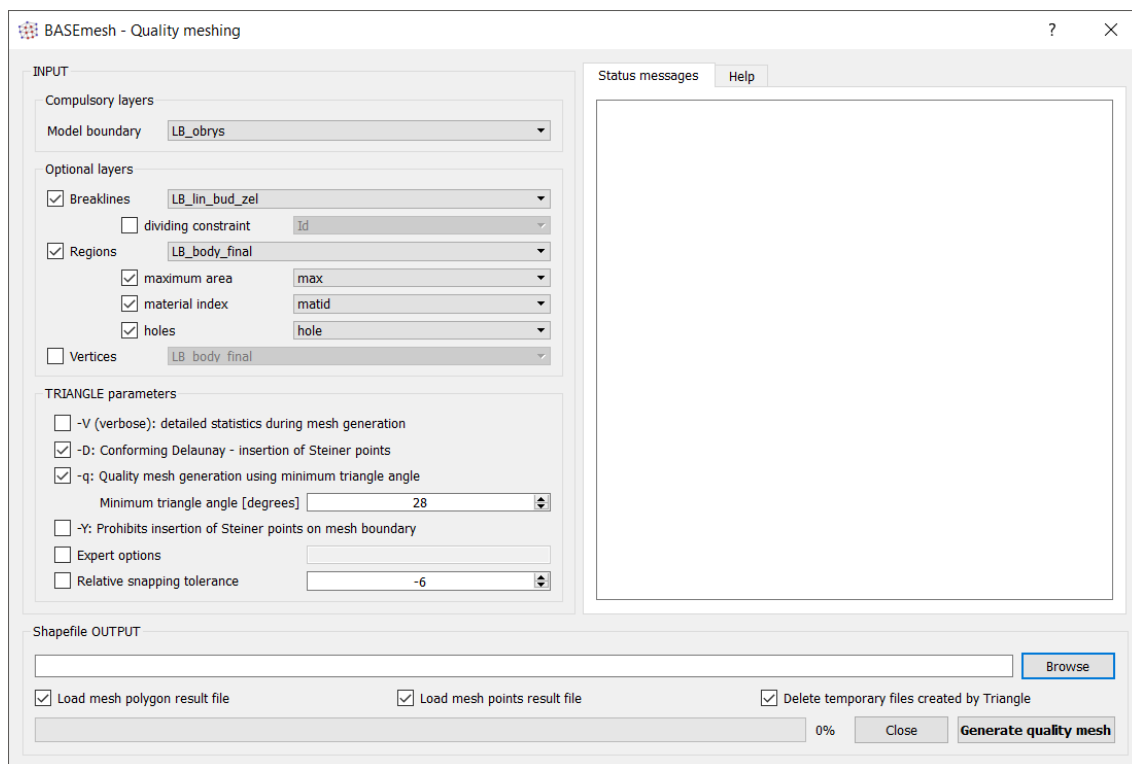
Touto cestou vznikne výpočetní síť, jejíž bodový soubor bude mít přiřazeny výšky. Pro vytvoření je potřebný soubor hranice oblasti a soubor bodů s výškami. Je možné také určit tzv. breaklines neboli povinné spojnice, které musí strany trojúhelníků jednotlivých elementů kopírovat. Nevýhodou této metody je nemožnost nastavení maximální plochy elementu výpočetní sítě. Často tak vznikne příliš hrubá síť, která není pro kvalitní hydraulické výpočty vhodná. Jedná se v podstatě o digitální model terénu ve formátu TIN.

- Quality mesh

Výpočtová síť vytvořená touto cestou nabízí daleko více možností nastavení. Proto byla tato metoda použita pro tvorbu výpočetní sítě, dále použitého v hydraulických výpočtech. Vstupem jsou dříve připravené soubory. Jako první musíme určit hranice oblasti. Existuje i možnost užití povinných spojníc trojúhelníkové sítě neboli soubor s regiony budov a různých druhů území. Quality mesh pak oproti Elevation mesh umožňuje nastavit v jednotlivých regionech maximální plochu elementu, materiálový index a informaci o vyřiznutí daného regionu z výpočtové sítě. Vyřiznutí regionu se využívá v případě budov v záplavovém území, neboť zastavěná plocha se nepodílí na proudění vody. Není zde obsažena informace o reliéfu terénu, úkolem je pouze vytvořit vhodnou výpočtovou síť vzhledem k velikosti elementu, která se při řešení této práce nastavila na hodnotu 40 m².

Po vytvoření výpočetní sítě bylo třeba přiřadit jednotlivým bodům jejich výšky. K tomu byl použit nástroj interpolace výškových dat. Vstupem jsou body výpočtové sítě, které nemají informaci o své nadmořské výšce. Ta se může získat jednak z povrchu terénu ve formátu TIN, jednak z rastrového formátu digitálního modelu terénu, který byl použit v našem případě. Rastr výšek o rozlišení 1,5 m byl získán z digitálního modelu České republiky 5. generace a je náhled se nachází na obrázku 4-8.

Po zpracování jednotlivých vstupů jsme tedy získali soubor obsahující elementy a soubor obsahující body s výškovou informací, detail výpočtové sítě levého břehu (elementy s různým materiálovým indexem, body a vyřiznutí otvoru v místě budov) je vidět na obrázku 5-8. Posledním krokem je tedy export geometrie 2D oblasti do formátu *.2dm, který podporuje simulační program BASEMENT.



Obrázek 5-7 Tvorba výpočetní sítě nástrojem Quality mesh



Obrázek 5-8 Detail výsledné výpočtové sítě

V předchozích odstavcích byla popsána tvorba nové výpočtové sítě. Pro případ, že kvalita výpočtové sítě nevyhovuje, nebo se potřebuje upravit výška bodu či materiálový index, existuje možnost ruční úpravy. Můžeme například sloučit více elementů, nebo je vymazat. Spolu s úpravou elementů je potřeba také upravit vrstvu bodů. Po ruční editaci

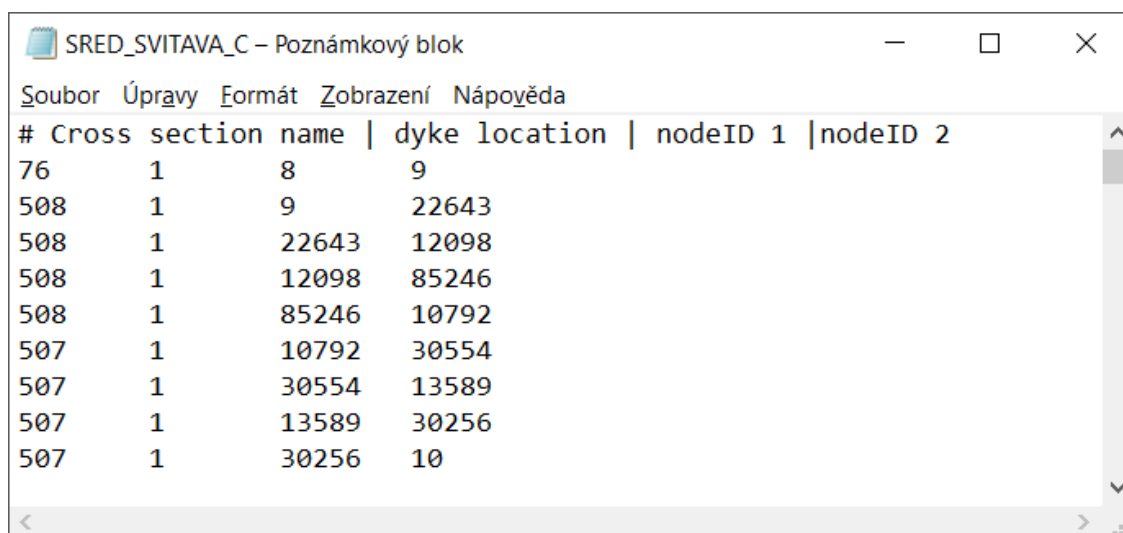
je nutné znovu přechíslovat elementy a body tak, aby odpovídali skutečnému počtu a umístění. K tomu slouží nástroj „renumber mesh“. Po provedení této operace je možné opět vyexportovat soubor s geometrií.

5.4 KONTROLA GEOMETRIE MODELU

Geometrie především jednorozměrného modelu je třeba před spuštěním výpočtů zkontrolovat z hlediska správného umístění a orientace. K tomu je v prostředí QGISu opět potřeba zásuvný modul BASEmesh, konkrétně nástroj importu geometrie. Zde lze importovat hotový soubor geometrie 1D i 2D modelu. Soubor 1D modelu se zobrazí jako jednotlivé body příčných profilů a linie profilů. Po importu dvourozměrného modelu jsou zobrazeny jednotlivé elementy a body, podobné výstupu při tvorbě Quality meshe.

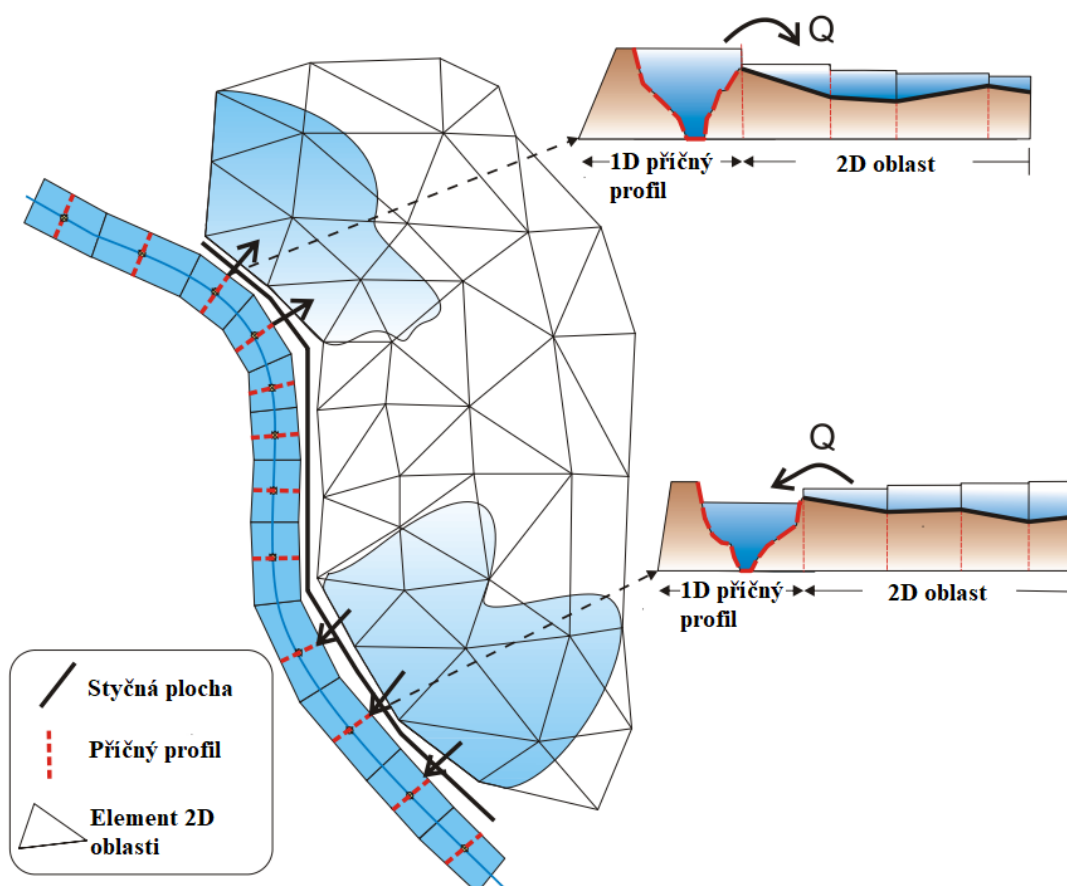
5.5 SPŘAŽENÍ 1D A 2D MODELU

Ke spřažení je potřeba nadefinovat spojovací soubor, který určuje příslušnost elementů 2D sítě přímo sousedící s 1D oblastí k příčným profilům. Díky spřažení je možno dosáhnout plnění či prázdnění 2D oblastí na základě výšky hladiny v příčných profilech. Spojovací soubor v textovém tvaru musí obsahovat název příčného profilu, odpovídající čísla uzlů propojovaných elementů a informaci o tom, zda se jedná o levý nebo pravý břeh. Každý element je připojen maximálně k jednomu příčnému profilu. Fungování spřaženého modelu je znázorněno na obrázku 5-10.



#	Cross section name	dyke location	nodeID 1	nodeID 2
76	1	8	9	
508	1	9	22643	
508	1	22643	12098	
508	1	12098	85246	
508	1	85246	10792	
507	1	10792	30554	
507	1	30554	13589	
507	1	13589	30256	
507	1	30256	10	

Obrázek 5-9 Ukázka spojovacího souboru

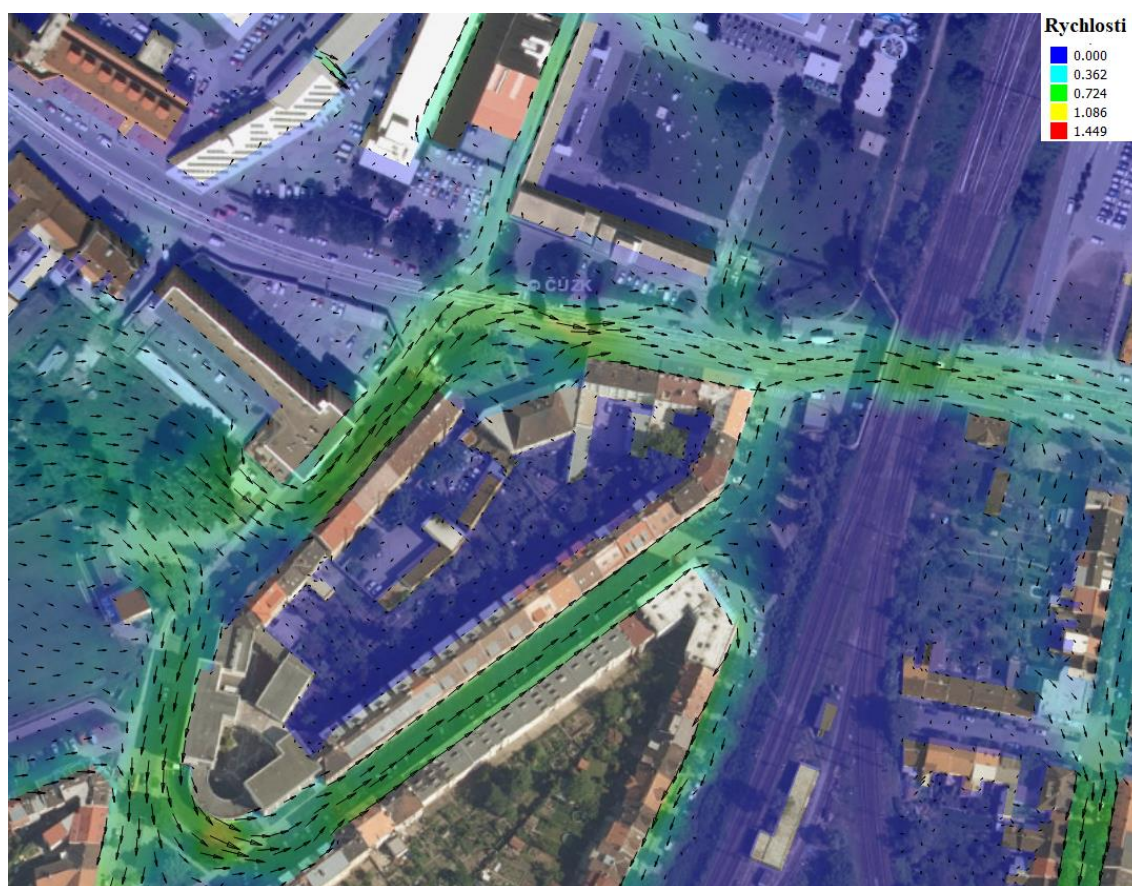


Obrázek 5-10 Jak funguje spřažení 1D/2D [13]

Na základě propojovacího souboru v textovém formátu generuje program BASEMENT po spuštění výpočtu i verzi souboru ve formátu *.shp. Díky tomu lze správnost napojení vizuálně zkontrolovat v prostředí QGISu.

5.6 ZOBRAZENÍ VÝSTUPŮ

Program BASEMENT nemá přizpůsobeno uživatelské prostředí pro přímé prohlížení výsledků. Výstupy 1D modelu jsou generovány ve formě textového souboru. Ten obsahuje mnoho informací. Nás však nejvíce zajímá nadmořská výška hladiny v jednotlivých profilech, aby bylo možné vytvořit příčný a podélný profil. Pro dvourozměrnou oblast jsou výstupy po proběhnutí výpočtu k dispozici ve formátu *.sol, ten je možné prohlížet pomocí zásuvného modulu Crayfish programu QGIS. Vytvořeny jsou celkem tři soubory, které nesou informace o nadmořské výšce hladiny, hloubce vody a rychlosti proudění v jednotlivých bodech výpočtové sítě.



Obrázek 5-11 Zobrazení výstupu rychlostí 2D modelu

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ

Stávající stav povodňového nebezpečí v řešeném území byl prověřen spřaženým numerickým modelem na průchod kulminačních průtoků Q_5 , Q_{20} , Q_{100} a Q_{100N} . V kapitolách 3.2.4 a 3.3.4 byl popsán stávající stav ochrany na základě vyhlášených záplavových území. V této kapitole budou popsány výsledky numerického modelu řešeného úseku, které jsou dále zpracovány v podobě map povodňového nebezpečí a tvoří přílohy této práce.

V blízkosti okrajových podmínek lze předpokládat ovlivnění výsledků modelu. Z tohoto důvodu dále nebudou vyhodnoceny až po železniční most v km 37,043. Spodní úseky toků jsou ovlivněny nepřesnostmi vyplývajícími ze zadání spodních okrajových podmínek, a nejsou proto zcela korektní, zejména se jedná o nepropustný podjezd dálnice D1 na ulici Kaštanová. Zpřesnění celkových výsledků se dosáhne plánovaným spojením modelů jednotlivých dílčích částí úseků, řešených v různých diplomových pracích.

6.1 KULMINAČNÍ PRŮTOK Q_5

Při tomto průtoku nedochází k vybřežení z koryta Svitavy ani Svatky. Řešené území je tak chráněno proti kulminačnímu průtoku s průměrnou dobou opakování pět let.

6.2 KULMINAČNÍ PRŮTOK Q_{20}

Na průtok Q_{20} je řešené území také poměrně dobře chráněno. Již však začíná docházet k místnímu překročení kapacity koryta na řece Svatce i Svitavě.

Pravý břeh řeky Svatky je kapacitní až po železniční most v km 35,574 ulice Přerovská, poté dochází k mírnému vybřežení do inundačního území v místě přírodního koupaliště a golfového areálu. Most ulice Sokolova vrací vodu zpět do toku, ale pod ním opět zaplavuje přilehlé území tvořené převážně zelení.

Levý břeh Svatky je na dvacetiletý průtok chráněn na řešeném úseku v celé své délce.

I pravý břeh vodního toku Svitava je pro průtok Q_{20} kapacitní.

Levý břeh Svitavy je kapacitní až po železniční most v km 3,341. Poté začne voda vybřežovat a zaplaví přilehlé zemědělské plochy. Voda nateče až do prostoru před dálničním násypem. Jelikož zde ve 2D modelu nebyla zadána okrajová podmínka, voda

se zde kumuluje. Ve skutečnosti se zde nachází propust pod dálničním tělesem, který z území vodu odvádí.

6.3 KULMINAČNÍ PRŮTOK Q_{100}

Při průtoku Q_{100} již dochází ke značnému vybřežení obou toků v řešeném území.

Na pravém břehu Svratky dochází k rozlivu mezi železničními mosty v km 37,043 a km 36,442. Zde vyplňuje voda celé území ohraničené železničními násypy a zaplavuje tak zahrádkářskou oblast a budovy Správy železniční dopravní cesty. Poté je koryto kapacitní až po železniční most v km 35,574 na ulici Přerovská, kde rozliv kopíruje téměř souvisle ulici Kšírovu až po dálnici.

Levý břeh řeky Svratky je kapacitní pro průtok Q_{100} až po železniční most na ulici Přerovská, poté dosahuje ulice Hněvkovského, která není v celé své délce zaplavena a tvoří tak rozhraní mezi rozlivem řeky Svratky a rozlivem na pravém břehu řeky Svitavy. Rozliv pokračuje až k dálničnímu tělesu.

Pravý břeh Svitavy nedostačuje svou kapacitou hned od začátku řešeného úseku, kde se voda dostává na ulici Cejl a pokračuje ulicemi směrem do koryta Ponávky. Kapacitní se stává opět od železničního mostu v km 6,052 po železniční most v km 3,614, kde se voda dostane z koryta a zpětně zaplaví přilehlé pole až k ulici Černovická. Od tohoto bodu již kapacita koryta opět nevyhovuje.

Levý břeh Svitavy je oproti hladině kulminačního průtoku níže již od počátku sledovaného úseku a voda tak zaplavuje zastavěné území v městské části Brno – Židenice, které je ohraničeno ulicemi Gajdošova, Táborská a Petrůvky. U železničního mostu v km 6,005 se voda vrací do koryta, ze kterého se opět vylévá u železničního mostu v km 3,614. Tam zaplavuje blízké přilehlé území a pod mostem v km 3,341 již vyplňuje souvisle celé území ohraničené železničním a dálničním násypem.

6.4 KULMINAČNÍ PRŮTOK Q_{100N}

Pro průtok Q_{100N} budou popsány pouze změny oproti záplavovému území při kulminačním průtoku Q_{100} . V případě vodního toku Svitavy a jeho kapacity nedochází ke změnám.

Pravý břeh řeky Svratky nově nedosahuje kapacity vůči danému průtoku i v oblasti mezi železničními mosty v km 36,355 a 35,574. Voda se zde vylévá z koryta a v podstatě zaplavuje území ohraničené železničními násypy. Pod druhým jmenovaným železničním mostem je situace obdobná předchozímu scénáři, voda však překročí ulici Kšírova a hranice zaplaveného území je souběžné ve vzdálenosti cca 70 metrů.

Pravý břeh řeky Svratky přestává být kapacitní u železničního mostu v km 37,043. Voda se dostane až na úroveň ulice Trnitá, poté pokračuje podjezdem železnice na ulici Plotní a zaplní vodou území až po Ponávku. Pod vodou se ocitne celá část Komárova, ohraničená Svitavou, Svratkou, Ponávkou a dálničním násypem, kromě průmyslové oblasti okolo ulice Masná.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo hodnocení povodňového nebezpečí na území města Brna, v soutokové oblasti Svitavy a Svratky. K tomuto účelu byl vytvořen spřažený 1D/2D numerický model v programu BASEMENT.

Po vymezení cílů práce bylo ve třetí kapitole podrobně popsáno zájmové území, jeho geomorfologie, charakteristiky povodí, hydrologické údaje a klimatické poměry. Dále zde byly zmíněny některé historické povodně, které zájmové území v minulosti postihly.

Další kapitola pak pojednávala o hydraulických výpočtech, byl zde popsán 1D i 2D matematický a numerický model, který byl v této práci použit. Dále byla popsána vstupní data modelu, byly zmíněny jeho nejistoty a postup kalibrace.

Pátá kapitola názorně ukázala průběh zpracování modelu v programu BASEMENT. Bylo popsáno uživatelské prostředí, tvorba geometrie pro jednorozměrný a dvourozměrný model. Dále bylo vysvětleno fungování spřažení 1D s 2D modelem a zobrazování výsledků.

V šesté kapitole proběhlo vyhodnocení výsledků hydraulických výpočtů z hlediska kapacity koryta pro jednotlivé kulminační průtoky řešené v této práci. Byly také uvedeny zdroje nepřesností výsledků modelu a řešení pro jejich odstranění, jež spočívá ve spojení modelů jednotlivých úseků, které již byly zpracovávány, a prodloužení úseku pod Soutok Svitavy se Svratkou.

8 PODKLADY A LITERATURA

- [1] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 1. Svratka (st): Situace toku*. Formát: *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [2] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 15. Svitava (st): Situace toku*. Formát: *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [3] Charakteristiky toků a povodí ČR. In: *Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD)* [online]. b.r. [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/24/charakteristiky-toku-a-povodi-cr.html>
- [4] Významné řeky. *Povodí Moravy, s.p.* [online]. b.r. [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vyznamne-vodni-toky/>
- [5] STUDIE PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ NA ÚZEMÍ JIHOMORAVSKÉHO KRAJE: 4. SHRNUÍ A STANOVENÍ PRIORIT. In: *Krajský úřad Jihomoravského kraje* [online]. b.r. [cit. 2017-12-30]. Dostupné z: https://www.kr-jihomoravsky.cz/archiv/ozp/protipovodnova_opatreni_jmk_2007/4_cast/Kapitola_4.pdf
- [6] BRÁZDIL, Rudolf, Hubert VALÁŠEK a Eva SOUKALOVÁ. *Povodně v Brně: historie povodní, jejich příčiny a dopady*. Vyd. 1. Brno: Statutární město Brno, 2010. Brno v minulosti a dnes. ISBN 978-80-86736-22-8.
- [7] Evidenční list hlásného profilu č. 375: Stanice Brno - Poříčí. In: *ČHMÚ* [online]. Brno, b.r. [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307205
- [8] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 1. Svratka: Podélný profil km 33,537 - km 40,352*. Formát: *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [9] *Povodňový informační systém* [online]. b.r. [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: <http://www.povis.cz/html/>

- [10] Evidenční list hlásného profilu č. 380: Stanice Bílovice nad Svitavou. In: ČHMÚ [online]. Brno, b.r. [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=306989
- [11] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 15. Svitava: Podélný profil km 0,000 - km 11,200*. Formát *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [12] VD Brno. *Povodí Moravy, s.p.* [online]. b.r. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/brno/>
- [13] VETSCH, D. *System Manuals of BASEMENT, Version 2.7*. ETH Zurich: Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), 2017. Dostupné také z: <http://www.basement.ethz.ch>
- [14] KAVALÍROVÁ, Anna. *Studie protipovodňových opatření v lokalitě Maloměřice na Svitavě v km 8,085 - 10,950*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
- [15] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 1. Svratka (pf): Příčné profily*. Formát *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [16] *Generel odvodnění města Brna - část toky, č. 15. Svitava (pf): Příčné profily*. Formát *.dxf. Brno: Povodí Moravy, státní podnik, 2007.
- [17] 3D webová služba DMR 5G. In: *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. b.r. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://ags.cuzk.cz/arcgis/rest/services/3D/dmr5g/ImageServer>
- [18] HALAŠKA, Ondřej. *Místní šetření zájmového území provedeno dne 12. 10. 2017*. b.r.
- [19] D04 - záplavové území největší zaznamenané přirozené povodně: formát *.shp. *Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, veřejná výzkumná instituce* [online]. b.r. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/download.php?id_souboru=3030

- [20] Prohlížeč služba Esri ArcGIS Server - Základní mapy ČR. *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. b.r. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://ags.cuzk.cz/ArcGIS/rest/services/zm/MapServer>
- [21] Prohlížeč služba Esri ArcGIS Server - Ortofoto ČR. *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. b.r. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://ags.cuzk.cz/ArcGIS/rest/services/ortofoto/MapServer>
- [22] *BASEMENT - Basic Simulation Environment* [online]. 2018 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.basement.ethz.ch>
- [23] *Centrální datový sklad pro mapy povodňového nebezpečí a povodňových rizik* [online]. b.r. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://cds.chmi.cz/?lang=cs>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1: Seznam geomorfologických jednotek, kterými protéká řeka Svratka.....	6
Tabulka 3-2: N-leté průtoky LG Brno – Poříčí [7]	8
Tabulka 3-3: Stupně povodňové aktivity LG Brno – Poříčí [7]	8
Tabulka 3-4: Hodnoty průtoků použité ve výpočtech, Svratka dle [8] [7]	8
Tabulka 3-5 Seznam geomorfologických jednotek, kterými protéká řeka Svitava [6] ..	14
Tabulka 3-6: N-leté průtoky LG Bílovice nad Svitavou [10]	15
Tabulka 3-7: Stupně povodňové aktivity LG Bílovice nad Svitavou [10]	15
Tabulka 3-8: Hodnoty průtoků použité ve výpočtech, Svitava [11]	16
Tabulka 4-1: Použité hodnoty drsnostního součinitele	28
Tabulka 5-1 Obsah finální verze příkazového souboru	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1 Vymezení zájmového území	3
Obrázek 3-2 Řešený úsek Svratky	4
Obrázek 3-3 Přehledná mapa povodí Svratky [3]	5
Obrázek 3-4 Záplavové území Svratka, km 38,030 – km 35,574 [9]	9
Obrázek 3-5 Záplavové území Svratka, km 35,574 – km 33,948 [9]	10
Obrázek 3-6 Řešený úsek Svitavy	12
Obrázek 3-7 Přehledná mapa povodí Svitavy [3]	13
Obrázek 3-8 Záplavové území Svitavy, horní úsek [9]	16
Obrázek 3-9 Pohled na vodní nádrž Brno [12]	19
Obrázek 4-1 Jez Radlas, km 6,424	22
Obrázek 4-2 Schematizace řešené oblasti	23
Obrázek 4-3 Oblasti zájmového území rozdělené dle materiálového indexu	29
Obrázek 4-4 Horní okrajová podmínka ve formě hydrogramu	30
Obrázek 4-5 Dolní okrajová podmínka na toku Svitava	30
Obrázek 4-6 Dolní okrajová podmínka na toku Svratka	31
Obrázek 4-7 Zadání okrajových podmínek modelu	31
Obrázek 4-8 Stínovaný reliéf terénu získaný z digitálního modelu terénu 5. generace [17]	33
Obrázek 5-1 Základní prostředí programu BASEMENT	36
Obrázek 5-2 Zdrojový kód příkazu	37
Obrázek 5-3 Prostředí vytváření příkazového souboru	37
Obrázek 5-4 Editace a prohlížení 1D geometrie	40
Obrázek 5-5 Ukázka zadávání příčného profilu	40
Obrázek 5-6 Funkce zásuvného modulu BASEmesh	41
Obrázek 5-7 Tvorba výpočetní sítě nástrojem Quality mesh	43

Obrázek 5-8 Detail výsledné výpočtové sítě	43
Obrázek 5-9 Ukázka spojovacího souboru	44
Obrázek 5-10 Jak funguje spřažení 1D/2D [13]	45
Obrázek 5-11 Zobrazení výstupu rychlostí 2D modelu.....	46

SEZNAM PŘÍLOH

A. Průvodní a technická zpráva

B. Výkresová dokumentace

B.1. Podrobný podélný profil Svratky

B.2. Podrobný podélný profil Svitavy

B.3. Příčné řezy Svratky

B.4. Příčné řezy Svitavy

C. Výstupy z hydraulických výpočtů

C.1. Mapa rozlivů

C.2. Mapy hloubek

C.2.1. Mapa hloubek pro Q5

C.2.2. Mapa hloubek pro Q20

C.2.3. Mapa hloubek pro Q100

C.2.4. Mapa hloubek pro Q100N

C.3. Mapy rychlostí

C.3.1. Mapa rychlostí pro Q5

C.3.1. Mapa rychlostí pro Q20

C.3.1. Mapa rychlostí pro Q100

C.3.1. Mapa rychlostí pro Q100N

D. Fotodokumentace